

森林総合研究所  
交付金プロジェクト研究 成果集 1

松くい虫被害の生物的防除  
による総合的研究調査

独立行政法人 森林総合研究所  
2002. 8

## 序 文

森林が多面的機能を十分に発揮できるためには、森林生態系が健全で活力ある状態に保たれていることが不可欠であるが、時として予期せぬ気象害や侵入生物、さらには人為による生態系の攪乱によって森林の健全性は著しく損なわれる。特に1905年以来我が国に侵入してきた病原微生物マツノザイセンチュウおよびその媒介者であるマツノマダラカミキリによって発生するマツ材線虫病による松くい虫被害は1977年をピークに徐々に減少してきてはいるが、いまだに終息に至ってはいない。したがって、今後の松くい虫被害対策は、その被害の特性を踏まえ、特に公益的機能が高く、全国的にも関心の高いマツ林等に重点をおき、地域の実態に応じた被害対策を総合的に推進する必要がある。しかしながら、防除体系の中で最も広域的かつ効果的な防除技術である航空機による薬剤散布は、周知のごとく農薬による環境汚染等の問題もあり、将来的には取りやめる方向であるため、今後は、微害または被害が終息したマツ林においては、天敵等を利用した生物的防除が切望される。

本研究「松くい虫被害の生物的防除による総合的研究調査」は、特定研究として平成9年度から開始され、平成13年度までの5年にわたり、森林総合研究所が実施したものである。本研究では、上記のような状況にかんがみ、新しい生物農薬の探索、天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシの生理・生態、およびマツノザイセンチュウの脱皮誘導物質や後食期のマツノマダラカミキリ成虫誘引物質等を利用した生物的防除法の開発、さらにはマツ林の抵抗性誘導技術の開発を行うとともに、これらの成果に基づく松くい虫の総合防除マニュアルの骨子を策定することにより、松くい虫被害の総合的防除法の確立を目標として実施されたものである。

この研究成果は、今後における我が国の松くい虫被害対策に関わる試験研究及び行政を推進する上で貴重な知見を与えるものと考えるので、ここに本書を広く関係者の参考に供する次第である。

平成14年8月

独立行政法人 森林総合研究所理事長

廣 居 忠 量

目 次

研究の要約	-----	1
第1章 生物的防除手法の確立	-----	9
1. 生物農薬 BT 剤の選抜と殺虫効果の検討	-----	9
2. サビマダラオオホソカタムシの寄生特性・産卵特性の解明と 大量人工飼育法の確立	-----	14
(1) サビマダラオオホソカタムシの大量人工飼育法の確立	-----	14
(2) サビマダラオオホソカタムシの寄生特性・産卵特性の解明	-----	18
第2章 生理活性物質による防除法の確立	-----	24
1. マツノザイセンチュウの脱皮誘導に関する化学的要因とその 化学構造の解明	-----	24
2. 後食期マツノマダラカミキリ成虫の誘引剤の開発	-----	26
第3章 松林の抵抗性誘導技術の開発	-----	29
1. 成木の抵抗性誘導技術の開発	-----	29
2. 菌根菌フロラの誘導技術の開発	-----	33
3. マツ枯損激害化に関わる環境要因の効果の解明	-----	40
第4章 松くい虫被害の総合的防除法の確立	-----	45
1. 松くい虫の総合防除マニュアルの策定	-----	45

# 研究の要約

## I 研究年次及び予算区分

研究年次：平成 9～13 年（5 年）

予算区分：運営交付金（特定研究、交付金プロジェクト）

## II 主任研究者

主 査：生物管理科長、森林昆虫研究領域長

田畑勝洋（平成 9 年 4 月 1 日～11 年 3 月 31 日）

吉田成章（平成 11 年 4 月 1 日～14 年 3 月 31 日）

副主査：

取りまとめ責任者：吉田成章

## III 研究場所

森林総合研究所、本所、関西支所、九州支所

## IV 研究目的

松くい虫被害については、これまでの防除活動の展開によって全国的に被害水準の低下が見られており、ほとんどの地域で被害率が 1%未満の微害状態となってきた。しかし、早期に被害の終息に向けた取り組みを一層促進するためには地域全体の防除水準の向上に加えて防除手段を効果的に組み合わせる必要がある。本研究では、殺虫力の高い病原菌（BT）の探索、天敵微生物の施用法の改良、天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシ人工増殖と寄生特性の解明、生理活性物質の特性解明、誘導抵抗性の有効性の検討、マツ枯損と外生菌根菌との関係及び激害化阻害要因の解明に基づいた新たな生物的防除法を開発し、既存の防除法と組み合わせることで地域の被害実態に応じた総合的な松くい虫被害対策マニュアルを作成し、被害の終息に役立てようとするものである。

## V 研究方法

### 第 1 章 生物的防除手法の確立

#### 1. 生物農薬 BT 剤の選抜と殺虫効果の検討

① 各地から採集した土壌試料、樹皮試料、マツノマダラカミキリ成虫死体試料の懸濁液を加熱することにより芽胞以外を殺菌することで *Bacillus* 属を選抜し、培養し、得られたコロニーをさらに普通寒天培地に移植、培養して芽胞を形成させ、染色して検鏡した。分離した BT の中からマツノマダラカミキリ成虫に殺虫性を持つものを選抜するため、分離菌の懸濁液に浸漬したクロマツの当年枝を与えてマツノマダラカミキリ成虫に飼育し死亡を調査した。② *B. bassiana* F-263 を 3 週間培養し、得られた分生子を大豆油に懸濁し、これを針葉付きアカマツの枝に噴霧し、マツノマダラカミキリ成虫に与えて飼育し、死亡の有無と死因を調査した。

#### 2. サビマダラオオホソカタムシの寄生特性・産卵特性の解明と大量人工飼育法の確立

##### (1) サビマダラオオホソカタムシの大量人工飼育法の確立

オオコクヌスト用人工飼料を参考にして、サビマダラオオホソカタムシ幼虫用の人工飼料を作製した。幼虫の飼育では実験室内での大量飼育の容易なハチノスツヅリガ終齢幼虫をカミキリムシ幼虫の代用昆虫として用いた。まず、ハチノスツヅリガ終齢幼虫の頭と胸部の間を細い糸で縛って蛹へ変態しない永久幼虫を作り、これに孵化幼虫を接種し、孵化幼虫をそのまま人工飼料の上に置いて飼育した。幼虫が3齢幼虫に育った後、人工飼料のみを与えた。成虫の飼育では蚕蛹粉末、乾燥酵母、蔗糖、ペプトン、鶏卵黄の乾燥物およびセルロース粉末を混合して固めた固形の成虫用飼料を作製した。岡山県産の成虫にこの人工飼料と水を含んだスポンジを与えて飼育し、産卵前期間の調査、産卵数の調査を行った。

## (2) サビマダラオオホソカタムシの寄生特性・産卵特性の解明

① 岡山県和気郡和気町の36年生アカマツ林で、林内の枯死木16本を長さ1mに玉切りし、支所構内へ搬入し、野外の網室に入れて保存したのち割材し、材内の調査を行った。②生立木アカマツ樹幹を長さ20cmに切り、カミキリ成虫に産卵させたものを樹脂製の円筒型容器に入れ、ホソカタムシ成虫、孵化幼虫を放飼したのち、剥皮、割材し寄生状況を調査した。③アカマツ丸太にカミキリを産卵させ、野外の網室一部屋に1本ずつ入れ、翌年まで保存した。この丸太にホソカタムシの卵を放飼し、剥皮、割材してカミキリの死亡状況とホソカタムシの寄生状況を調査した。④アカマツ生立木20本を伐倒枝打ちし、樹幹を生立木に立て掛け、網掛けをし、カミキリ成虫を放って約10日間産卵させた。この供試木にホソカタムシ成虫を放飼し、剥皮、割材し、樹幹内のカミキリの生存状況を調べた。

## 第2章 生理活性物質による防除法の確立

### 1. マツノザイセンチュウの脱皮誘導に関する化学的要因とその化学構造の解明

PDAに酵母抽出物を加えた培地に、*Contortylenchus genitalicola*から分離された微生物とマツノザイセンチュウを接種し出現した分散型3期幼虫を含む線虫を供試線虫とした。枯損マツから得たマツノマダラカミキリ老熟幼虫または強制産卵させた後人工飼料で飼育したマツノマダラカミキリを羽化させ生じた蛹殻を有機溶媒で抽出して分散型4期幼虫誘導物質のサンプルとした。サンプルをペーパーディスクに含浸させ風乾後供試線虫と管瓶に入れ誘導された分散型4期幼虫数の割合を分散型幼虫誘導率とした。

### 2. 後食期マツノマダラカミキリ成虫の誘引剤の開発

6種類モノテルペン炭化水素および2種類のパインニードル油を調整し、一定量を脱脂綿にしみ込ませて、孔をあけたプラスチックカップに入れ、マダラコール用の誘引器にセットし、独立行政法人森林総合研究所千代田試験地のアカマツ林で、任意にマツを選んで、高所の枝に吊り下げ、後食期のマツノマダラカミキリ成虫の誘引数を調査した。

## 第3章 松林の抵抗性誘導技術の開発

### 1. 成木の抵抗性誘導技術の開発

① 実験開始時にマツ材線虫病の発生していない茨城県七会村の30年生アカマツ林を試験林とし、弱病原力センチュウを接種区と接種しない区を設け、それぞれに対して強病原力センチュウの接種の有無を組み合わせ、マツの生死を確認した。② マツ材線虫病が発生している茨城県千代田町のアカマツ、クロマツ混交林を試験林とし、平成10年に試験林のおよそ半数のマツに弱病原力センチュウを接種した。平成11年と平成12年に前年に接種して生き残ったマツに弱病原力センチュウを接種し、マツの生死を確認した。

## 2. 菌根菌フロアの誘導技術の開発

① 関東森林管理局東京分局森林技術センターで、すでにアカマツの枯損が進行しているアカマツ人工林で、平尾根を中心に約 20 × 30m の、アカマツ、アカシデ、クリを残した区、アカマツ、アカシデを残した区、アカマツ以外を伐採した区、下層植生を整理しただけの区、腐植層除去区、対照区の組み合わせを設け、外生菌根菌の子実体発生調査を行った。施業後4年目に菌根の掘取り調査を行い、菌根の垂直分布を調査した。② 上記プロット周辺域のアカマツ林において、斜面間や位置の違いについて掘取り調査を行い、菌根分布調査を行った。③ アカマツを宿主とするヌメリイグチを用いて、液体培地で増殖、固体培地での増殖・固定、そして3万本規模の播種床での4ヶ月無菌根苗への接種・感染を行った。

## 3. マツ枯損激害化に関わる環境要因の効果の解明

① サンケイ式昆虫誘引器の捕虫容器部分を生け捕り用とするトラップを考案し、その効率をみた。② 改良型マツノマダラカミキリ用トラップをマツ枯損の少ない桜島と、これに隣接し激しいマツ枯損の見られる薩摩半島、大隅半島に設置し、マツノマダラカミキリの飛来状況を調査するとともに、捕獲虫を破碎、抽出してマツノザイセンチュウの検出を行った。③ 火山灰を付着させたクロマツ切り枝と付着させない切り枝にマツノマダラカミキリ成虫を放し、火山灰のマツノマダラカミキリに対する忌避効果、摂食阻害効果、寿命に及ぼす効果を調べた。④ 桜島南西部鳥島の鹿児島大学溶岩実験林内のクロマツ幼樹に対しマツノザイセンチュウを接種し、以後の病徴を調査した。

## 第4章 松くい虫被害の総合的防除法の確立

### 1. 松くい虫の総合防除マニュアルの策定

本プロジェクトの個別技術の開発のうち寄生特性等が解明された天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシについて、現行防除システムのなかに組み込むために、現行の防除法で被害を終息に導く場合の問題点を把握し、防除率の検討を行い、導入手法を検討した。

## VI 研究結果

### 第1章 生物的防除手法の確立

#### 1. 生物農薬 BT 剤の選抜と殺虫効果の検討

土壌から何株かの BT が分離できたが、マツノマダラカミキリ成虫に殺虫力があるものは見つからなかった。*B. bassiana* の油懸濁液をマツに散布してマツノマダラカミキリに添食したところ、水懸濁液より高い殺虫効果を示した。

#### 2. サビマダラオオホソカタムシの寄生特性・産卵特性の解明と大量人工飼育法の確立

##### (1) サビマダラオオホソカタムシの大量人工飼育法の確立

天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシ幼虫用人工飼料、成虫用人工飼料を開発し、卵から次世代の産卵までの大量人工飼育が可能となった。

##### (2) サビマダラオオホソカタムシの寄生特性・産卵特性の解明

岡山産サビマダラオオホソカタムシ孵化幼虫は樹皮表面から材内のカミキリ蛹室まで自力で到達、寄生できることがわかった。岡山県内でサビマダラオオホソカタムシの寄生率は5月下旬は低かったが、6月下旬には8割以上に達した。網室内放飼試験でもサビマダラオオホソカタムシの殺虫効果が認められた。

## 第2章 生理活性物質による防除法の確立

### 1. マツノサイセンチュウの脱皮誘導に関する化学的要因とその化学構造の解明

線虫の病原性を制御する技術の一環として線虫の分散型IV期幼虫誘導成分とみられるものが特定の溶出画分に認められ、線虫の脱皮を制御する成分特定の糸口を見つけた。

### 2. 後食期マツノマダラカミキリ成虫の誘引剤の開発

6種のモノテルペン炭化水素混合物とβ-フェランドレンに後食期のマツノマダラカミキリ成虫誘引効果が認められたが、β-フェランドレンの入手が困難なため実用化は難しいと判断された。

## 第3章 松林の抵抗性誘導技術の開発

### 1. 成木の抵抗性誘導技術の開発

弱病原力線虫の接種によりマツ成木でも誘導抵抗性は発現したが、発病が遅れるだけの場合が多かった。実用化のためには誘導性の発現機構を洗い直す必要があることが分かった。

### 2. 菌根菌フロラの誘導技術の開発

アカマツ林の腐植層除去によって深部土壤に生息する菌類を活性化し、その態勢維持の可能性を示した。鉱物質土壤で増殖・固定化したヌメリイグチによる感染苗で量産を可能とした。

### 3. マツ枯損激害化に関わる環境要因の効果の解明

桜島で被害がひどくならない原因として、線虫を保持するカミキリの外部からの侵入が少なかったこと、自生するクロマツの材線虫病感受性が低かったこと、の二点が抽出された。

## 第4章

### 1. 松くい虫の総合防除マニュアルの策定

現行の個別防除法の有効性を明らかにし、これらを駆使することによって被害を減少方向に導くことが可能であることを示した。駆除における被害木の防除残しが重要であり、サビマダラオオホソカタムシは現行防除法に組み込む素材として有望であることを示した。

## Ⅶ 今後の問題点

### 第1章 生物的防除手法の確立

#### 1. 生物農薬 BT 剤の選抜と殺虫効果の検討

BT の探索は、有効な菌株が発見されればその意義は大きいので、かなりの困難が予想されるが継続して探索を行う。糸状菌の油懸濁液は、 $10^7/ml$  以下の濃度で野外試験を行い、効果を調査する必要がある。

#### 2. サビマダラオオホソカタムシの寄生特性・産卵特性の解明と大量人工飼育法の確立

##### (1) サビマダラオオホソカタムシの大量人工飼育法の確立

人工飼料が腐敗し易いという欠点がある。この点を順次改良していく。

##### (2) サビマダラオオホソカタムシの寄生特性・産卵特性の解明

今回行った一連の予備放飼試験のホソカタムシの寄生率は、岡山県内における野外の寄生率 80%前後を再現するには至らなかった。その原因として、寄生に適した寄主の発育段階と放飼のタイミングが完全に一致していなかったこと等がある。今後は滋賀県内に設定した野外試験地内での放飼試験を継続する予定である。本課題は、交付金プロジェクト「サビマダラオオホソカタムシを利用したマツノマダラカミキリ防除技術の開発」として実用化に向けた新たな開発課題に発

展させた。

## 第2章 生理活性物質による防除法の確立

### 1. マツノザイセンチュウの脱皮誘導に関する化学的要因とその化学構造の解明

分散型3期幼虫を分散型4期幼虫へ誘導する化学的要因の化学的特性まで明示できたことから、今後、化学構造の決定を進めていく。

### 2. 後食期マツノマダラカミキリ成虫の誘引剤の開発

誘引効果が最大となる放出量または濃度を決定することが今後の問題点であるが、 $\beta$ -フェランドレンは、入手が困難な上、高価であるため誘引剤として利用することは妥当ではないと考えられ、これ以上の進展は難しい。

## 第3章 松林の抵抗性誘導技術の開発

### 1. 成木の抵抗性誘導技術の開発

マツの誘導抵抗性の発現の程度は、弱病原力センチュウの接種方法、弱病原力センチュウの分離株によって変わることも示されていることから、より効果的に誘導抵抗性を発現させる接種方法とセンチュウの分離株を探索することとしている。

### 2. 菌根菌フロアの誘導技術の開発

立地環境の異なった広域での共生根系のモニタリングを長期間行い、根系を加味した林地管理の検討、また消失したアカマツ林の回復に向けて外生菌根菌の活用技術の改善開発を行う必要がある。なお、菌根菌の強化が抵抗性をどの程度高めるかについては実験的に明らかにしていくこととしている。

### 3. マツ枯損激害化に関わる環境要因の効果の解明

火山ガスの影響は、桜島における近年の火山活動の沈静化と材線虫病被害の激害化との関連を考える上でも検討されるべき課題であるが、研究の実行に際しては有毒ガスの取り扱いという方法論上、設備上の問題点を解決する必要がある。桜島に自生するクロマツの材線虫病感受性の低さがマツ自体に由来するものか、土壌条件によるものかという点については、実験条件下で育苗された苗を用いた接種実験により明らかにしていく予定である。

## 第4章 松くい虫被害の総合的防除法の確立

### 1. 松くい虫の総合防除マニュアルの策定

現場に適用するためには、機関誌、パンフレットといった文書化以上に、現場に直結した技術の移転が必要である。今後、講演、講習、研修、委員会等を通じて、普及につとめる。必要な防除率については、さらに考察を進める。サビマダラオオホソカタムシの組み込みについては、交付金プロジェクトの完成に向けて現行システムへの組み込みを検討する。

## VIII 研究発表

1. Okabe, H., Ezaki, T., Marumoto, T. and Yamamoto, K. (1997) Effectiveness of Mycorrhizal Association in Revegetation, *J. Agri. Meteorol.*, 52, 609-612
2. 阿部豊、福田和也、田畑勝洋 (1997) 後食期マツノマダラカミキリのトラップ誘引試験、第108回日本林学会大会講演要旨集、85
3. 清原友也、小坂肇、相川拓也 (1998) 交配試験からみたマツノザイセンチュウとニセマツノザイセンチュウの種内・種間関係、平成9年度森林総合研究所成果選集、6-7

4. Kiyohara, T., Kosaka, H., Aikawa, T., Ogura, N. and Tabata, K. (1998) Experiment of induced resistance in 30-year-old Japanese red pine stand. Program and Abstracts. 23, Symposium on Sustainability of Pine Forests in Relation to Pine Wilt and Decline. Tokyo, Oct. 1998, 26-30
5. Kosaka, H., Kiyohara, T., Aikawa, T., Ogura, N. and Tabata, K. (1998) Re-examination of the induced resistance of pine trees to pine wilt disease by prior inoculation with avirulent isolates of the pine wood nematode, ICPP98 Abstracts, 3:3.7, 68
6. 曾根晃一、大隈浩美、中村克典、田實秀信、佐藤嘉一 (1998) 桜島におけるマツノマダラカミキリの分布と線虫保持状況、第42回日本応用動物昆虫学会大会講演要旨集 134
7. 浦野忠久 (1999) サビマダラオオホソカタムシのマツノマダラカミキリ穿入丸太に対する室内放飼試験、日林関西支部50回大会研究発表要旨集、82
8. Kiyohara, T., Kosaka, H., Aikawa, T., Ogura, N. and Tabata, K. (1999) Experiment of induced resistance to pine wilt disease in pine forest. In Sustainability of Pine Forests in Relation to Pine Wilt and Decline, Proceedings of International Symposium. Tokyo, Oct. 1998, 103-104
9. 中村克典、曾根晃一、大隈浩美 (1999) サンケイ式昆虫誘引器を改良したマツノマダラカミキリ生け捕り用トラップ、応動昆、43、55-59
10. 曾根晃一、福山周作、大隈浩美、田實秀信、佐藤嘉一、中村克典 (1999) 桜島におけるマツノマダラカミキリの生息状況、第110回日林学術講、735
11. 真鳥克典 (1999) マツノマダラカミキリの材線虫保持状況をモニタリングするための生け捕り用トラップの製作とその有効性、森林総合研究所九州支所年報、11、23
12. Ogura, N., Tabata, K. and Wang, W. (1999) Rearing of the colydiid beetle predator, *Dastarcus helophoroides*, on artificial diet., *BioControl*, 44, 291-299
13. 浦野忠久、上田明良、藤田和幸、小倉信夫、三浦香代子 (2000) マツノマダラカミキリの捕食寄生者サビマダラオオホソカタムシの野外における寄生状況、111回日本林学会学術講演集、351
14. 浦野忠久 (2000) マツノマダラカミキリの天敵サビマダラオオホソカタムシの網室内放飼試験、日林関西支部51回大会研究発表要旨集、52
15. 浦野忠久 (2000) マツノマダラカミキリの天敵サビマダラオオホソカタムシの枯死樹幹内における寄生状況、森林総合研究所関西支所年報41、25
16. 小倉信夫 (2000) 中国寧夏におけるゴマダラカミキリとサビマダラオオホソカタムシの飼育、森林防疫、49、51-54
17. 小倉信夫 (2000) カミキリムシの天敵昆虫を大量飼育、現代林業、6月号、52
18. 小倉信夫、チャオジュン (2000) サビマダラオオホソカタムシの人工飼料による飼育法の改良、第111回日林大会講演集、352
19. 小坂肇、相川拓也、小倉信夫、田畑勝洋、清原友也 (2000) 非病原性マツノザイセンチュウの接種によるマツ材線虫病の抵抗性誘導の試み、111回日林学術、270-271
20. Kosaka, H., Kiyohara, T., Aikawa, T., Ogura, N., Tabata, K. and Kiyohara, T. (2000) Pine wilt disease by the pine wood nematode and the induced resistance of pine trees by the avirulent nematode, First International Symposium on Induced resistance of Plant Diseases, Corfu, Greece, May, 2000, Program, Abstracts of Papers and List of Participants:101, 22-27

21. Kosaka, H., Kiyohara, T., Aikawa, T., Ogura, N., Tabata, K. and Kiyohara, T. (2000) Induced resistance of pine trees against pine wilt disease by avirulent nematode inoculation. , XXI IUFRO World Congress 2000, Kuala Lumpur, Malaysia, August, Poster Abstracts vol. 3, 376-377
22. 中村克典 (2000) 枯れにくい松林を創り出すために生態学的微害化の考え方と実現への模索、日本の松の緑を守る 72、4-8
23. 岡部宏秋 (2000) 外生菌根菌の機能利用に向けて、微生物の資材化：研究の最前線 (鈴木孝仁ほか編)、ソフトサイエンス社、71-80
24. 岡部宏秋 (2000) 植物根系を利用する共生戦略、森林微生物生態学 (二井一禎他編)、朝倉書店、41-56
25. 小倉信夫 (2000) 砂漠の緑を守る天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシ、研究ジャーナル、23、25-27
26. 浦野忠久 (2001) 「うじ虫」は何になる？、森林総合研究所関西支所研究情報、582
27. 浦野忠久 (2001) マツノマダラカミキリの天敵サビマダラオオホソカタムシの室内放飼実験、森林総合研究所所報、149、7
28. 浦野忠久 (2001) サビマダラオオホソカタムシのマツノマダラカミキリ産卵木への野外放飼試験、日本林学会関西支部第 52 回大会研究発表要旨集、91
29. 浦野忠久 (2001) サビマダラオオホソカタムシのマツノマダラカミキリ穿入丸太に対する網室内放飼試験、森林総合研究所関西支所年報、42、22
30. 小倉信夫 (2001) 天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシの産卵前期間、第 53 回日本林学会関東支部大会講要講要、38
31. 山田利博、小坂肇 (2001) 第 21 回 IUFRO 世界大会 マレーシアからー樹病部門ー、森林防疫、50、135-140
32. 山田利博、小坂肇、富樫一巳、鎌田直人 (2001) 第 21 回 IUFRO 世界大会、樹木医学研究、5、25-29
33. Kosaka, H., Kiyohara, T., Aikawa, T., Ogura, N., Tabata, K. and Kiyohara, T. (2001) Pine wilt disease caused by the pine wood nematode: the induced resistance of pine trees by the avirulent isolates of nematode. , European Journal of Plant Pathology, 107, 667-675
34. Kosaka, H., Kiyohara, T., Aikawa T., Ogura, N., Tabata, K and Kiyohara, T. (2001) Induced resistance of pine trees against pine wilt disease by avirulent nematode inoculation. , IUFRO World Series Vol. 11. Protection of world forests from insect pest: Advances in research, 181-184
35. 岡部宏秋 (2002) 森が抱え、森を支える菌根菌、山林、No.1414、32-38

## IX 研究担当者

第 1 章 島津光明、小倉信夫、浦野忠久

第 2 章 田畑勝洋、中島忠一

第 3 章 岡部宏秋、小坂肇、中村克典

第 4 章 吉田成章、島津光明、小倉信夫、浦野忠久、田畑勝洋、中島忠一、岡部宏秋、小坂肇、中村克典

研究課題一覧（12年度まで）

(1) 生物的防除手法の確立		
①生物農薬 BT 剤の選抜と殺虫効果の検討	生物・昆虫病理研	9～12
②サビマダラオオホソカタムシの寄生特性・産卵特性の 解明と大量人工飼育法の確立	関西支所・昆虫研 生物・線虫研	9～12
(2) 生理活性物質による防除法の確立		
①マツノザイセンチュウの脱皮誘導に関する化学的要因 とその化学構造の解明	生物・化学制御研	9～12
②後食期マツノマダラカミキリ成虫の誘引剤の開発	生物・生物管理科	9～10
(3) 松林の抵抗性誘導技術の開発		
①成木の抵抗性誘導技術の開発	生物・線虫研	9～12
②菌根菌フロラの誘導技術の開発	生物・土壌微生物研	9～12
③マツ枯損激害化に関わる環境要因の効果の解明	九州・昆虫研	9～(11)～12
(4) 松くい虫被害の総合的防除法の確立		
①松くい虫の総合防除マニュアルの策定	生物・昆虫病理研、 線虫研、化学制御研 、生物管理科、土 微生物研、関西・昆 虫研、九州・昆虫研	12

研究課題一覧（13年度）

1. マツノマダラカミキリ生存率制御技術の開発		
(1) 天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシの利用技 術の開発	関西・生物被害研 G、森林病理研	13
(2) 天敵微生物の選抜と殺虫効果の検討	昆虫管理研	13
(3) 微害林における低密度維持要因の解明	九州・森林動物研G	13
2. マツノザイセンチュウの病原性制御技術の開発		
(1) 脱皮誘導に関する化学的要因とその化学構造の解明	昆虫管理研	13
(2) 抵抗性誘導技術の開発	森林病理研	13
(3) 菌根菌フロラの誘導技術の開発	微生物生態研	13
3. 松くい虫被害の総合的防除法の確立		
(1) 松くい虫の総合防除マニュアルの策定	森林病理研、昆虫管 理研、微生物生態研、 九州・森林動物研 G、関西・生物被害 研G	13

## 第1章 生物的防除手法の確立

### 1. 生物農薬 BT 剤の選抜と殺虫効果の検討

#### ア 研究目的

本病害では媒介者であるマツノマダラカミキリの防除を目的として化学農薬が使われてきたが、種々の問題があることから、微生物的防除法の開発が試みられてきた。その結果、糸状菌の一種である *Beauveria bassiana* が有力な病原微生物であることが判明し<sup>4)</sup>、幼虫防除への利用法が開発され一定の成果をあげつつある<sup>5)</sup>。一方、この虫の成虫は幼虫に比べて *B. bassiana* に対する感受性が低いため、化学農薬の予防散布に相当する方法でこの菌を健全マツ類の樹冠に使用しても、死亡率が低くだけでなく、死亡までの時間がかかる<sup>4)</sup>。すなわち、マツのザイセンチュウの伝搬とマツノマダラカミキリ自身の産卵を許すことになり、たとえ最終的にある程度の成虫を殺虫できても、被害防止の役には立たないことになり、*B. bassiana* は、このままでは成虫を対象として利用することは困難と考えられている。

このため、マツノマダラカミキリ成虫の微生物的防除を行うためには、成虫に即効的に作用する新たな病原微生物を検索するか、あるいは既知の病原微生物の施用法を改善して、殺虫力を高める方法を開発することが必要である。そこで本研究では、食毒性の毒素を作ることにより即効的殺虫性のあることで知られる芽胞細菌、*Bacillus thuringiensis* (以下BTと略) の中で、マツノマダラカミキリ成虫に殺虫性のものを探索する。同時に、この虫の成虫にある程度の病原力をもつ *B. bassiana* について、施用法を改良することで殺虫率の向上をはかる。

#### イ 研究方法

##### ① BTの検索

各種試料から、マツノマダラカミキリ成虫に殺虫力のある BT を分離することを試みた。土壌試料としては、千葉県富津市のクロマツ海岸林、茨城県牛久町雑木林、茨城県つくば市雑木林、長野県南牧町雑木林、茨城県茎崎町アカマツ林、の土壌を用いた。樹皮試料としては、茨城県茎崎町のアカマツとクロマツの2年枝と当年枝を針葉がついたまま用いた。マツノマダラカミキリ成虫死体試料としては、研究室内で飼育早期に死亡したマツノマダラカミキリ成虫死体を用いた。これらの試料をそのまま、または磨砕したのち、300ppm の Tween80 水溶液に 1/10 ~ 1/20 の割合で混合し、試験管用ミキサーで1分間振盪して懸濁液を作り、65℃ 30分加熱することにより芽胞以外を殺菌することで *Bacillus* 属を選択した。この懸濁液を 10 ~ 100 倍に希釈して、その 0.1 または 0.2ml を滅菌ガラス棒で普通寒天培地の平板に塗布して 30℃ で4日間培養し、得られたコロニーをさらに普通寒天培地に移植して3週間培養して芽胞を形成させ、アミドブラックと石炭酸フクシンで染色して検鏡し、parasporal inclusion (副胞子小体、PI と略) を形成しているものを BT とみなした。

分離した BT の中からマツノマダラカミキリ成虫に殺虫性を持つものを効率的に選抜するため、分離菌を 3 ~ 15 株ずつのグループにまとめ、10ml の Tween80 の 300ppm 水溶液を加えて懸濁混合した。懸濁液にクロマツの当年枝を浸漬し風乾したのち、研究室で羽化させたマツノマダラカミキリ成虫に添食した。1グループあたり 7 ~ 12 頭の成虫を用いた。接種後の成虫は 25℃ で飼育し、菌液に浸漬した枝の樹皮を完全に食べたのちは通常クロマツまたはアカマツの枝

で飼育し、死亡の有無と死因を調査した。

## ② *B. bassiana* 油懸濁液散布

熊本県産マツノマダラカミキリ幼虫由来で、本虫に対してもっとも病原力の強い *B. bassiana* F-263 を 1%酵母エキス加用 Sabouraud ショ糖寒天培地で 25 °C で 3 週間培養し、得られた分生子を大豆油に懸濁し  $10^6 \sim 10^9$ /ml の濃度にした。これを針葉付きアカマツの枝に、5 cm の小枝 20 本あたり 5 ml、または 30cm の大枝 3 本あたり 45ml を噴霧した。比較のため、それぞれ Tween80 100ppm 水溶液に同濃度に分生子を懸濁したものをスプレーした区も設けた。研究室で羽化させたマツノマダラカミキリ成虫にこの枝を与えて飼育し、5 cm 枝では完食してから、また 30cm 枝では 1 日後に通常の枝に交換して、プラスチックカップ内で 25 °C で飼育し、死亡の有無と死因を調査した。成虫は 1 濃度あたり 20 頭 ( $10^9$  のみは 10 頭) 供試した。

このほかに、分生子油懸濁液の直接接触による効果を調べるため、各濃度の懸濁液を 1 滴触角に付着させる、 $10^9$ /ml の懸濁液を前胸背板に 1 滴付着させる、 $10^9$ /ml の懸濁液を各ふ節に付着させる、などの方法で接種した区も設けた。

## ウ 結果

### ① BT の検索

各種試料から芽胞細菌の分離を試みたうち、マツ類の樹皮、針葉、マツノマダラカミキリ死体からは、芽胞細菌はいくつか分離できたが、PI を形成するものは全くなかった。これに対し、いくつかの土壌からは PI を形成するものが分離できた。これらのうち、BT の典型といえる菱形の PI を形成するものはつくばの雑木林から 3 株得られた。四角形の PI を形成するものは荃崎町のアカマツ林から 3 株分離された。また、PI 様ではあるが、典型的な形ではなく亜球形のものを形成するものが富津、南牧、牛久、つくばの各土壌から合計 55 株分離された (写真-1)。

これらの分離菌を添食された成虫の平均死亡率は 20 % であった。調査期間中に死亡したものについての接種後死亡までの日数は、14 ~ 47 日であった。最も早く死亡したのは南牧町由来の亜球形 PI を形成する 3 株を混合接種した 12 頭中の 1 頭で 14 日で死亡したが、これを含め、全死亡個体から芽胞細菌を再分離しても PI を形成しているものはなかった。

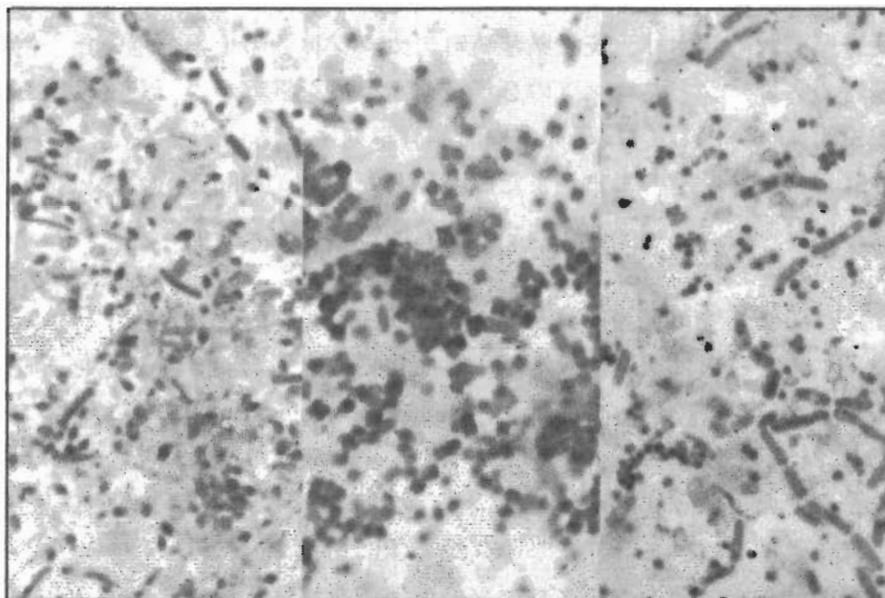


写真-1 土壌から分離された 3 タイプの *Bacillus thuringiensis* の parasporal inclusion body。左から菱形、四角形、亜球形。

② *B. bassiana* 油懸濁液散布

*B. bassiana* 分生子の油懸濁液を散布した小枝 (5cm) を与えたマツノマダラカミキリ成虫は、懸濁液の濃度に応じて感染死亡した (図-1)。各濃度の枝を与えたときの半数致死日数 (LT<sub>50</sub>) は表-1 のとおりであった。この結果からは同じ 10<sup>9</sup>/ml の濃度区では、水懸濁液の方が2倍多くの液をスプレーしていても LT<sub>50</sub> は約2日長く要した。

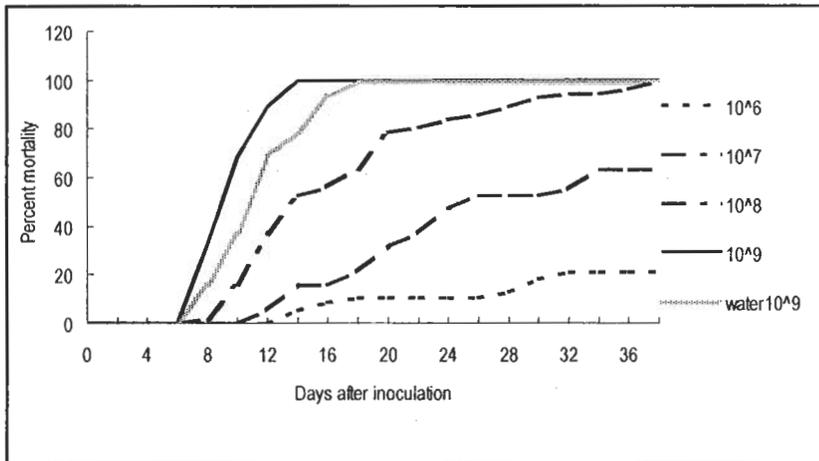


表-1 マツノマダラカミキリ成虫の半数致死日数。

噴霧液濃度	LT <sub>50</sub> (日)
油のみ	>39
10 <sup>6</sup> /ml 油	>39
10 <sup>7</sup> /ml 油	24.5
10 <sup>8</sup> /ml 油	13.5
10 <sup>9</sup> /ml 油	8.9
10 <sup>9</sup> /ml 水	10.8

図-1 *Beauveria bassiana*懸濁液を散布した小枝 (5cm) を添食したマツノマダラカミキリ成虫の感染死亡率

大枝 (30cm) への散布では、脚に付着した油の影響で歩行が困難になる成虫が多く、その影響で初期に衰弱して死亡するものが多かった。*B. bassiana* 感染死亡虫は添食後4日から現れ始め、10日までに多く出現した (図-2)。しかし、死亡率が分生子濃度に応じて高まらず、最も高い死亡率は 10<sup>7</sup>/ml 区で得られ、半数致死日数は8日であった。一方、水懸濁液をスプレーした区では、濃度が高いほど死亡率が高くなる結果が得られた。感染死亡虫の出現は、油懸濁液施用区よりも遅く、最も高い死亡率が得られた 10<sup>9</sup>/ml 区の半数致死日数は 12.5 日で、同濃度の水懸濁液を散布した小枝の結果より2日ほど長く要した。

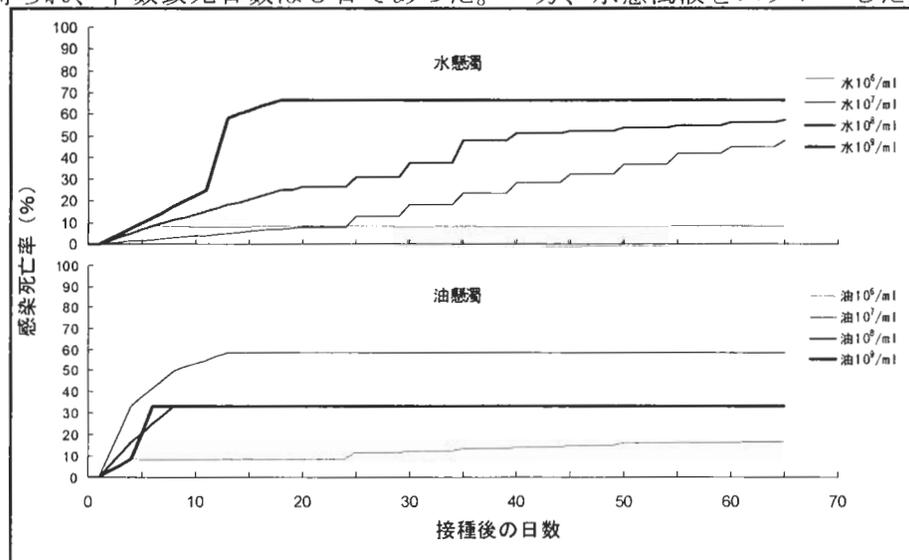


図-2 *Beauveria bassiana*懸濁液を散布した大枝 (30cm) を添食したマツノマダラカミキリ成虫の感染死亡率

*B. bassiana* 油懸濁液の直接接種では、触角に付着させたものは濃度に応じた死亡率が得られず、

10<sup>6</sup>/ml で 17 %であったが 10<sup>9</sup>/ml でも 29 %しかなかった。前胸背板に付着させる方法が最も感染死亡率が高く 7 日後で 86 %死亡した。ふ節に付着させたものは 30 日までに 55 %が死亡した (図-3)。

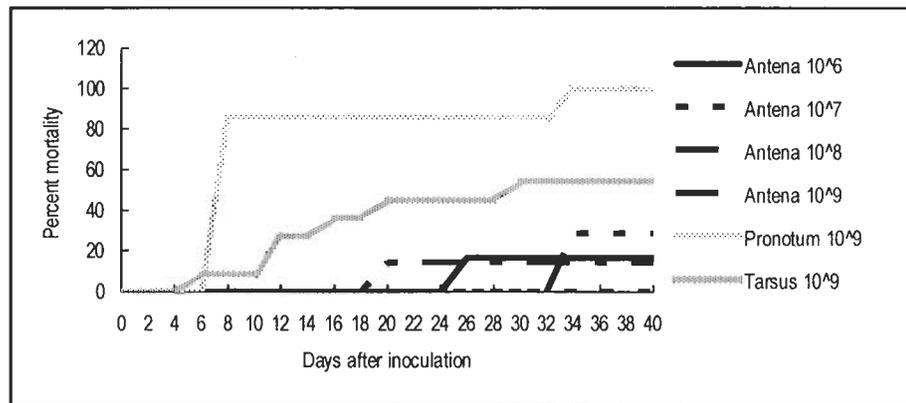


図-3 *Beauveria bassiana*油懸濁液を各種方法により直接接種したマツノマダラカミキリの感染死亡率

### エ 考察

各地の試料から PI を形成する芽胞細菌、すなわち BT と考えられる細菌を分離することができた。しかしそれらを接種された成虫の死亡率は 20 %で、かつ最短死亡時間は 14 日であった。さらに、死亡個体から接種菌の再分離を試みても、全く分離されなかった。これらのことから、接種した BT は、いずれもマツノマダラカミキリ成虫に対して病原性がないといえる。

BT は元々鱗翅目の幼虫に殺虫活性をもつ細菌と考えられてきた。殺虫活性が PI という毒素結晶に由来し、食毒性であるため、周囲への広がりや数が少なく、流行病を起こしにくい。また、特異性が高く、人畜に安全性が高い。さらに、量産が容易である上に、芽胞細菌であるため長期保存できる、など微生物殺虫剤として極めて優れた特性を持っている<sup>7)</sup>。そのため、世界中で多くの企業や研究者によって、新たな菌株のスクリーニングが行われ、カやブユに殺虫活性をもつ亜種の発見をきっかけに、多くの亜種あるいは系統が発見された。1980 年代からは、ハムシ、コガネムシ、ハエなどの昆虫の他、ダニや線虫に活性をもつ系統までも報告されている。しかし、膨大な研究にもかかわらず、カミキリムシ類に殺虫活性をもつものは、今のところ発見されていない。本研究で分離した BT も、マツノマダラカミキリに殺虫性が見られなかったが、BT は「探せば探すほどいろいろな菌株が見つかる」と言われており<sup>3)</sup>、カミキリムシに有効な菌株が見つかる可能性は残されている。マツノマダラカミキリ成虫に活性をもつ BT が発見されれば、即効性、安全性などの点から理想的な防除資材となりうるので、発見された場合の意義は大きい。しかし、かなり困難なことが予想される。

昆虫病原性糸状菌の分生子を油に懸濁して施用する、という方法は最近発明され、殺虫率の向上と乾燥条件下での感染率の向上が、その効果の主な特徴となっている<sup>1,2)</sup>。本研究の結果でも、マツノマダラカミキリ成虫に対して、油懸濁液の方が散布量は少なく死亡までの日数は短くなる効果が見られた。大枝を使った試験でもその傾向は見られたが、油による歩行困難で衰弱するものが多かった。しかし、水懸濁液では 10<sup>9</sup>/ml で達成できた感染死亡率を、油懸濁液では 10<sup>7</sup>/ml でもそれに近い死亡率を得ることができるなど、その効果は見られた。実験的には、散布する油の量を減らして成虫に与える負担を少なくしないと、正確な感染率は求められない。本研究で、水懸濁液を使っても 10<sup>9</sup>/ml の濃度であれば、半数の成虫は 10 ~ 12.5 日で殺せることが判明した。しかし、野外で大量散布するには 10<sup>8</sup>/ml 以上の濃度では必要な分生子量やコストの点から、濃

すぎて実用的ではない。すなわち、水懸濁液を使う限り *B. bassiana* を成虫防除に利用することは、ほとんど可能性がない。それが、油懸濁液の利用で、散布濃度が  $10^7/\text{ml}$  でも水懸濁液の  $10^9/\text{ml}$  に近い効果がみられたので、野外でもこの濃度で有効であれば、実用に使える濃度といえる。

油懸濁液には、感染率の向上以外にも、耐乾燥性や耐熱性が高まる効果があり<sup>6)</sup>、野外に施用した糸状菌の生存期間が長くなることが期待できる。長期にわたる有効性を必要とする成虫対象の散布では、油懸濁液による生存期間延長効果が役立つと考えられる。

#### オ 今後の問題点

BT の探索は、有効な菌株が発見されればその意義は大きい、かなりの困難が予想される。糸状菌の油懸濁液は、 $10^7/\text{ml}$  以下の濃度で野外試験を行い、効果を調査する必要がある。

#### カ 要約

各種試料から芽胞細菌の分離を試みたうち、土壌から何株かの BT が分離できた。しかし、いずれの菌もマツノマダラカミキリ成虫に殺虫力はなかった。

*B. bassiana* の油懸濁液をマツに散布してマツノマダラカミキリに添食したところ、水懸濁液より高い殺虫効果を示した。

#### キ 引用文献

- 1) Bateman, R. P., M. Carey, D. Moore, and C. Prior (1993) The enhanced infectivity of *Metarhizium flavoviride* in oil formulations to desert locusts at low humidities. *Ann. appl. Biol.*, 122, 145-152
- 2) P. Prior, C., P. Jollands and G. lePatourel (1988) Infectivity of oil and water formulations of *Beauveria bassiana* (Deuteromycotina: Hyphomycetes) to the cocoa weevil pest *Pantorhytes plutus* (Coleoptera: Curculionidae). *J. Invertebr. Pahtol.*, 52, 66-72
- 3) 佐藤令一 (2000) 昆虫病原細菌の資材化. 微生物の資材化：研究の最前線 (鈴木孝仁ら編). ソフトサイエンス社、東京、194 - 214
- 4) 島津光明・串田 保 (1983) 昆虫病原菌各株のマツノマダラカミキリに対する病原力、35 回日林関東支論、165-166
- 5) Shimazu, M., D. Tsuchiya, H. Sato and T. Kushida (1995) Microbial control of *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae) by application of nonwoven fabric strips with *Beauveria bassiana* (Deutyeromycotina: Hyphomycetes) on infested tree trunks. *Appl. Entomol. Zool.*, 30, 207-213
- 6) 清水 進 (2000) 昆虫病原糸状菌の資材化. 微生物の資材化：研究の最前線 (鈴木孝仁ら編). ソフトサイエンス社、215 - 222
- 7) Tanada and Kaya (1993) *Insect Pathology*. Academic Press, San Diego, 666pp

(島津光明)

## 2. サビマダラオオホソカタムシの寄生特性・産卵特性の解明と大量人工飼育法の確立

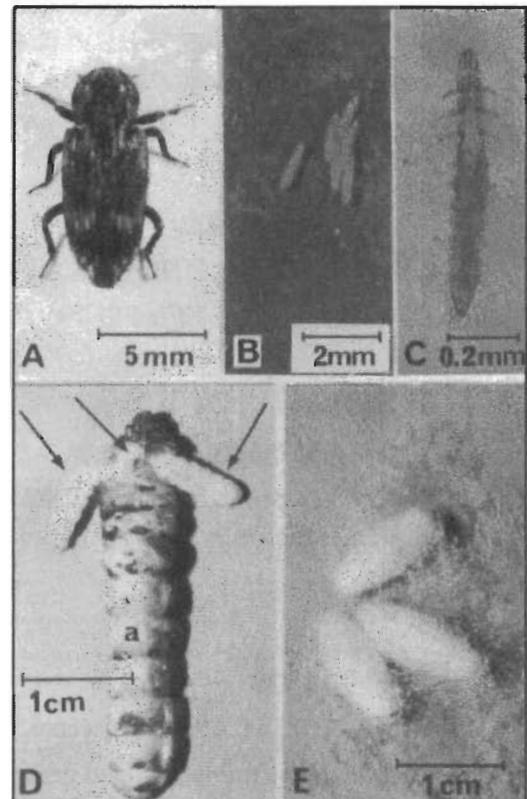
### (1) サビマダラオオホソカタムシの大量人工飼育法の確立

#### ア 研究目的

サビマダラオオホソカタムシは幼虫期にカミキリムシやクマバチなどの樹木穿孔性害虫を捕食する天敵昆虫である。我が国では九州、四国、本州に生息しており、広島県や岡山県ではマツ枯損木中のマツノマダラカミキリを捕食しているのが観察されている<sup>3, 7)</sup>。したがって、この天敵昆虫の大量放飼によるマツノマダラカミキリの生物的防除の可能性を検討する試験に供するサビマダラオオホソカタムシの大量飼育法を確立する。

#### 写真-1 サビマダラオオホソカタムシ

A. 成虫 B. 卵 C. 孵化幼虫 D. マツノマダラカミキリ幼虫 (a) を食べて育っている幼虫 (矢印) E. 繭



#### イ 研究方法

サビマダラオオホソカタムシ (以下ホソカタムシ) 成虫 (体長約 1 cm) は全体に鉄錆色でまだら模様があり (写真-1 A)、強力な口器で木に孔を開けることができるが、動作は極めて緩慢で動きまわる昆虫を捕食できない。卵はカミキリ幼虫が食い進んだ材内の孔や木表面のごつごつした皮の狭い隙間に産下される (写真-1 B)。孵化幼虫 (体長約 0.7mm) (写真-1 C) はすばやく動き回り、カミキリムシ幼虫などの昆虫に噛み付いて毒素を注入し、それによって麻痺あるいは死亡した昆虫に頭部をさしこんで体内の液やどろどろになった昆虫組織を吸って発育し、うじ虫 (体長約 1.6cm) のようになる (写真-1 D)。その後、同種および他種の天敵から身を守るために硬い繭を作って蛹化する (写真-1 E)。卵、幼虫、及び蛹の期間は、25℃でそれぞれ約 13、21 及び 15 日である。成虫は自らが抜け出てきた繭殻を食べ尽す。餌についてそれ以外の野外観察例はないが、実験室内では成虫は乾燥して硬くなった昆虫死体を好んで食べる。成虫の寿命は実験室内では3年に及ぶものもある。このような観察に基づいて、以下に述べる飼育法を試験した。

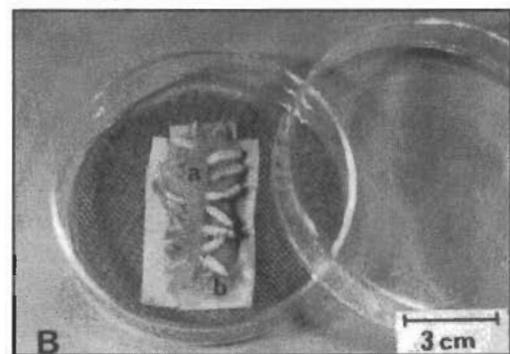


写真-2 人工飼料を食べて育っている3齢幼虫

① 幼虫の飼育

捕食性天敵昆虫の幼虫用の人工飼料としては、クサカゲロウやテントウムシ用に無機塩・糖・アミノ酸・脂質・ビタミン・水などを混合した飼料<sup>2)</sup>、ミツバチ雄幼虫の乾燥粉末を主成分とする飼料<sup>5)</sup>、牛肉・牛レバー・乾燥酵母・糖・蜂蜜・鶏の卵黄・水などを混合した飼料<sup>1)</sup>が開発されており、森林害虫に対する天敵昆虫オオコクヌスト用に蚕蛹粉末・乾燥酵母・酵母抽出物・糖・ペプトン・油脂などを混合した飼料<sup>6)</sup>が開発されている。そこでオオコクヌスト用人工飼料を参考にして、ホソカタムシ幼虫用の人工飼料を作製した(表-1)。

体長 1mm にも満たない孵化幼虫を集めて飼育容器に移すという作業は困難を伴う。また孵化幼虫に直接人工飼料を与えると、幼虫はこれに脚を取られて動けなくなり死亡する。このようなことから、実験室内での大量飼育の容易なハチノスツツリガ(ハチミツガ)終齢幼虫をカミキリムシ幼虫の代用昆虫として用いた。まず、ハチノスツツリガ終齢幼虫の頭と胸部の間を細い糸で縛って蛹へ変態しない永久幼虫を作り、これに孵化幼虫を5頭ずつ接種して、これに食いついた孵化幼虫をそのまま人工飼料の上に置いて飼育した。幼虫が3齢幼虫に育った後、人工飼料のみを与えた(写真-2)。対照区として、マツノマダラカミキリ終齢幼虫およびマツノマダラカミキリ蛹に孵化幼虫を接種し、餌交換をしないで飼育した。25 ± 1℃ 16時間明 8時間暗条件(LD16:8)で飼育し、羽化率と羽化当日の成虫体重を調べた。

② 成虫の飼育

蚕蛹粉末、乾燥酵母、蔗糖、ペプトン、鶏卵黄の乾燥物およびセルロース粉末を混合して固めた固形の成虫用飼料を作製した(表-2)。岡山県産の成虫にこの人工飼料と水を含んだスポンジを与えて25.0 ± 0.2℃ LD16:8の条件で飼育した。約2年後に産卵した。この卵からの孵化幼虫にハチミツガ幼虫と人工飼料を与えて飼育し、成虫を得て供試した。

産卵前期間の調査：羽化成虫雌 1頭と雄 2頭を一組にして同一の飼育容器(ペトリ皿：直径3cm、高さ2cm)に入れ、人工飼料と蒸留水を与え、20組ずつ28.0 ± 0.2、26.6 ± 0.2、及び25.0 ± 0.2℃、LD16:8の条件で飼育して、産卵前期間(羽化日から初めて産卵した日までの日数)を調べた。ホソカタムシ成虫は暗い場所を好むので、飼育容器中には一部をくり抜いたバルサ材(2.5 × 2.5 × 1.5cm)を入れた。このバルサ材の空隙に産んだ卵を発見できないで孵化幼虫を発見し

表-1 サビマダラオオホソカタムシ幼虫の人工飼料組成と製造法

A					
高圧滅菌水	43.35 ml	ソルビン酸	0.1 g	酵母抽出物	3.2 g
プロピオン酸	0.1 g	ペプトン	6.4 g	蚕蛹粉末	3.0 g
蔗糖	8.0 g	乾燥酵母	3.0 g	クエン酸	0.2 g
ラード	2.0 g	メチルパラベン	0.1 g	寒天	0.5 g
B					
仔牛血清	15 ml	ストレプトマイシン	0.025 g		
ニワトリ肝臓	15 g	テトラサイクリン	0.025 g		

Aを混合する。電子レンジで熱して寒天を溶かす。冷やして固める。これへ磨砕したBを加えて混合する。

表-2 サビマダラオオホソカタムシ成虫の人工飼料組成と製造法

蚕蛹粉末	45.0 g	ペプトン	8.0 g
乾燥酵母	24.0 g	乾燥鶏卵黄	10.0 g
蔗糖	8.0g	セルロース粉末	5.0 g

混合物に蒸留水40mlを加えて練り、棒状にする。風乾する(日陰干にして固める)。

た事例が生じた。この場合は孵化幼虫発見の日から卵期間 ( $28.0 \pm 0.2$ 、 $26.6 \pm 0.2$ 、及び  $25.0 \pm 0.2$  °Cでは、それぞれ、10、10および13日) を差し引いた日を産卵日とした。

産卵数の調査：1997年中国寧夏回族自治区で採集したホソカタムシの継代飼育系統の成虫を羽化後  $28.0 \pm 0.2$  °C、LD16:8の条件で6ヶ月間飼育した。次に、実験時期の調整のため  $12.0 \pm 0.2$  °Cで6ヶ月間飼育し、その後、4個の飼育容器(腰高シャーレ：直径9cm、高さ4cm)に20頭ずつ入れて人工飼料と蒸留水を与えて、 $25.0 \pm 0.2$  °C、LD16:8の条件で80日間飼育した。飼育容器中には一部をくり抜いたバルサ材(4.0 × 4.5 × 1.5cm)を入れた。後半の40日間はこのバルサ材を5日毎に取り替え、卵を取り出して計数した。卵を取り除いたバルサ材を  $25.0 \pm 0.2$  °Cで20日間保存し、それから這い出してきた孵化幼虫を計数し、卵数に加えて産卵数とした。81日目に成虫の上翅長を計った後、解剖して雌雄を調べた。

## ウ 結果

### ① 幼虫の飼育

人工飼料を与えて飼育した個体の成虫の体重は、カミキリ幼虫あるいは蛹を与えて飼育した個体に比べて、小型であった(表-3)。

### ② 成虫の飼育

産卵前期間の調査：岡山県産ホソカタムシ成虫の  $28.0 \pm 0.2$  °C飼育での産卵前期間は平均147日で、最も短いものは115日、最も長いものは172日であった。 $26.6 \pm 0.2$  °C飼育では、最も短いものは176日、最も長いものは542日であったが、20組中10組の雌は約570日経過した現在でも産卵していない。また、 $25.0 \pm 0.2$  °C飼育では、もっとも短いものは511日、最も長いものは560日であったが、20組中13組の雌は約570日経過した現在でも産卵していない。

産卵数の調査：産卵数を調べた中国産ホソカタムシ雌成虫の上翅長の平均±標準誤差、総産卵数及び1雌1日当たりの平均産卵数を表-4に示す。すべてを平均すると1雌1日当たり約12卵であった。

表-3 サビマダラオオホソカタムシの人工飼料による飼育結果

餌の種類	餌昆虫 1頭当たり 幼虫数	供試孵化 幼虫数	食いつき 成功幼虫 数(%)	蛹化数	羽化数 (%)	体重mg	
ハチミツガ +人工飼料	5	50	26(53.0)	26	26(100)	17♀ 9♂	35.8 33.2
カミキリ幼虫	5	20	15(75.0)	15	15(100)	8♀ 7♂	39.8 41.0
カミキリ蛹	2	20	15(75.0)	15	14(93.3)	5♀ 9♂	48.4 47.8

表-4 中国産サビマダラオオホソカタムシ雌成虫の上翅長と産卵数

飼育容器 番号	雌数	上翅長mm (平均±標準誤差)	総産卵数 (40日間)	平均産卵数 1雌/1日
1	11	6.13±0.20	5817	13.2
2	10	5.66±0.15	4600	11.5
3	10	6.05±0.23	3244	8.1
4	7	6.28±0.12	4512	16.1

## エ 考察

人工飼料を用いて飼育した幼虫由来の成虫は、マツノマダラカミキリ幼虫や蛹を餌として飼育したものとは比べて、小型であった。しかし、この成虫が産んだ卵から孵化した幼虫1頭とマツノマダラカミキリ終齢幼虫（体重約1 g）1頭ずつを試験管（直径 1.8cm 長さ 18cm）に閉じ込めたところ、カミキリムシ幼虫は孵化幼虫の攻撃を受けてほとんどが6日以内に死亡し、天敵としての能力は損なわれていなかった。一般に、捕食性昆虫は餌資源が不足した場合に小型の成虫になるといわれている。したがって、人工飼料による飼育で成虫が小型化することは大きな問題とされないであろう。

成虫は 28 °C 16 時間明 8 時間暗の条件で、20 個体全ての雌がおおよそ羽化3ヶ月後から6ヶ月後にかけて産卵を開始した。岡山県産ホソカタムシ成虫では、個体による違いは存在するとしても、比較的高い温度が卵巣発育を促進するものと思われる。したがって、異なる明暗条件や低温処理の影響の検討が残されているが、ホソカタムシ大量増殖の効率を高めるためには、成虫を少なくとも 28 °C 以上で飼育して採卵するのが望ましいといえる。また、旺盛に産卵する雌は、おおよそ1日12卵を産下するということをふまえて飼育の労務配分を練る必要があるといえる。

ホソカタムシ成虫は這って移動することが多く、飛翔しても1回の飛翔距離は最大2mといわれている<sup>4)</sup>。このことは成虫を放飼した場合に成虫がその地点に比較的長期間留まるので、活発に移動分散する他の天敵昆虫よりも局地的に高い害虫防除効果が得られるという可能性を示している。この観点から、この天敵昆虫のマツノマダラカミキリの生物的防除への利用を検討する必要がある。

## オ 今後の問題点

人工飼料が腐敗し易いという欠点がある。この点の改良が必要である。

## カ 要約

マツノマダラカミキリの生物的防除における天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシ利用の可能性の検討に供するために、蚕蛹粉末・乾燥酵母・酵母抽出物・糖・ペプトン・油脂・ニワトリ肝臓・牛血清等を成分とする幼虫用人工飼料を開発した。また、蚕蛹粉末・乾燥酵母・糖・ペプトン・ニワトリ卵黄・セルロースを成分とする成虫用人工飼料を開発した。

## キ 引用文献

- 1) Chohen, A. C. and Smith, L. K.(1998) A new concept in artificial diets for *Chrysoperla rufilabris*: The efficacy of solid diets, *Biological Control*, 13, 49-54
- 2) Hasegawa, M., Nijjima, K. and Matsuka, M.(1989) Rearing *Chrysoperla carnea* (Neuroptera:Chrysopidae) on Chemically defined diets., *Appl. Entomol. Zool.*, 24, 96-102
- 3) 井上悦甫 (1993) マツノマダラカミキリの天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシについて. *森林防疫*, 42, 171-175
- 4) Li, W. and Wu, C.(1993) *Integrated Pest Management in Poplar Cerambycid.*, China Forestry Publishing House, Beijing, 290 pp.

- 5) 新島恵子(1993) 我が国におけるクサカゲロウの大量飼育の可能性と問題点、植物防疫、47、453-457
- 6) Ogura, N. and Hosoda, R.(1995) Rearing of a coleopterous predator, *Trogossita japonica* (Col. : Trogossitidae), on artificial diets, *Entomophaga*, 40, 371-378
- 7) 竹常明仁 (1982) マツノマダラカミキリの天敵サビマダラオオホソカタムシ、森林防疫、31、228-230

(小倉信夫)

## (2) サビマダラオオホソカタムシの寄生特性・産卵特性の解明

### ア 研究目的

サビマダラオオホソカタムシ (以下ホソカタムシ) はカミキリムシ類の捕食寄生天敵であり、中国ではポプラ等の樹種を食害するゴマダラカミキリへの生物的防除素材としての利用が進められている。本種は日本国内にも分布し、岡山、広島両県ではマツノマダラカミキリ (以下カミキリ) に対する捕食寄生が確認されている<sup>1, 2)</sup>。岡本<sup>3)</sup>は岡山県内のアカマツ林における調査で、材線虫病によるアカマツ枯死木材内のカミキリの 58 %が本種の寄生を受けて死亡していたと報告し、本種がカミキリの防除素材として有望なものであることを示した。しかし本種は岡山、広島以外ではカミキリへの捕食寄生が確認されておらず、その生態も不明な点が多い。そこで本研究ではホソカタムシを用いたカミキリ防除技術開発の前段階として、分布地である岡山県内での調査および実験室、野外網室内と関西支所構内野外での放飼試験を行った。

枯損木のマツノマダラカミキリ蛹室内のホソカタムシ幼虫と菌を写真-1に示した。

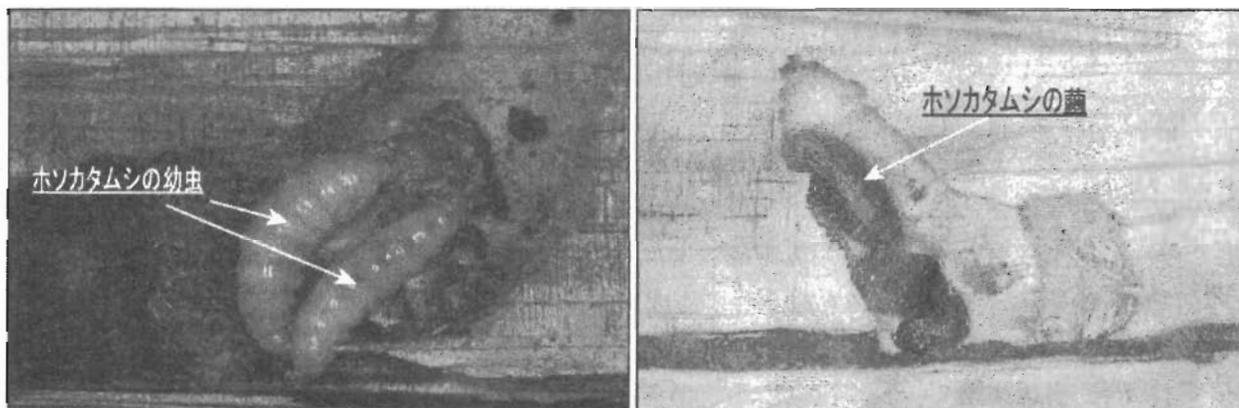


写真-1 マツノマダラカミキリ蛹室内のサビマダラオオホソカタムシ幼虫と菌

### イ 研究方法

#### ① 岡山県内における野外枯死樹幹内の寄生率の調査

調査地は岡山県和気郡和気町の36年生アカマツ林である。1999年5月中旬に林内の枯死木16本を伐倒し、樹幹を長さ1mに玉切りした。これらの丸太合計123本を5月21日に支所構内へ搬入し、野外の網室に入れて保存した。搬入した丸太を5月下旬から7月上旬にかけて割材し、材内の調査を行った。調査は丸太内(樹皮下、材内)のカミキリおよびその天敵の種類、生息数

およびステージについて行った。カミキリについては、生存個体数のほかに材入孔数および材内孔道数、成虫の脱出孔数を調べた。

#### ② 実験室内における放飼試験

1998年6、7月に伐倒したアカマツ樹幹（直径8～12cm）を長さ20cmに切り、カミキリ成虫に産卵させたものを実験に用いた。ホソカタムシは丸太を樹脂製の円筒型容器に入れ、その中に放飼した。まず成虫放飼を1998年8～11月にかけて3回行った。1回の実験につき丸太10本を用いて、それぞれの丸太に9～10頭のホソカタムシ成虫を放った。放飼期間は2週間で、成虫を回収して20日から1カ月後に丸太を剥皮、割材して寄生状況を調べた。1999年4～7月には同様の供試丸太10本を用いて孵化幼虫の放飼実験を行った。ホソカタムシ孵化幼虫を丸太1本につき10個体放ち、約1カ月後に剥皮、割材した。

#### ③ 野外網室内における放飼試験

1999年7月に関西支所構内でアカマツ生立木を伐倒、樹幹を長さ1mに玉切りし、直径8～16cmの丸太を16本用意した。これを25℃の恒温室に入れてカミキリに産卵させ、同年9月にテロン製の袋に入れて野外の網室（一部屋の大きさ：75W×75D×180H（cm））に一部屋1本ずつ入れ、翌年まで保存した。ホソカタムシは1998年および99年に岡山県内で採集した個体80頭を室内飼育しており、これらが2000年4月中旬から産卵を始めた。4月下旬から5月下旬にかけて、その時の産卵数に応じて、14本の丸太にホソカタムシの卵を放飼した。放飼卵数は最も少ない丸太で52、多いもので298となった。残り2本の丸太は対照区としておよそ150m離れた場所の網室に保管した。放飼丸太は40日後に剥皮、割材してカミキリの死亡状況とホソカタムシの寄生状況を調査した。対照区の丸太は6月中旬に剥皮、割材した。

#### ④ 関西支所構内における野外放飼試験

2000年7月中旬に関西支所構内でアカマツ生立木20本を伐倒枝打ちし、樹幹は玉切りせずに3カ所の試験地内で生立木に立て掛けた。7月下旬にそれぞれの供試木樹幹に2カ所ずつ網掛けをし、カミキリ成虫を放って約10日間産卵させ、翌年までそのまま放置した。2001年4月20日、10本の供試木に各30頭のホソカタムシ成虫を放飼し、5月18日に回収、樹幹を長さ1.5mに玉切りして網室に収納した。これを6月上旬から7月上旬にかけて剥皮、割材し、樹幹内のカミキリの生存状況を調べた。

### ウ 結果

#### ① 岡山県内における野外枯死樹幹内の寄生率の調査

カミキリの天敵としてはホソカタムシ、オオコクヌストおよびキツツキ類が確認された。供試木内にはカミキリの材入孔および材内孔道が高密度に見られたが、それに比べて生存虫数は非常に少なかった。カミキリの存在しない材内孔道の内で樹幹の繊維方向に孔道が伸長しているもの、および蛹室が形成されているものを、かつてそこに幼虫が存在したが捕食などの原因で死亡したものと仮定すると、そのような不在孔道が全体の78%を占めた。供試木からはオオコクヌストが合計19頭採集された。したがって不在孔道の一部は、本種の捕食によるものと考えられる。キツツキ類による捕食は樹幹表面の食痕から判別した。キツツキ類に捕食されたと見られる不在

孔道は全体の7%であった。ホソカタムシはカミキリの材内幼虫および蛹に寄生していた。本種による寄生率は5月下旬にはわずか3%であったが、7月上旬には15%に達した。それとともに供試木内のカミキリ生存個体数が減少し、5月下旬および6月上旬には生存率10%以上であったものが、6月下旬には27本の供試丸太から、幼虫と蛹それぞれ1頭しか採集されなかった(生存率1%)。不在孔道とキツツキによる捕食を除いた寄生率(5月以降実際に材内に生存していたカミキリの幼虫と蛹に対する寄生率)は、5月下旬の22%から徐々に増加して最終的には80%前後となった。全期間を通じた寄生率は54%であった。

② 実験室内における放飼試験

成虫放飼試験の結果を図-1上に示した(左から1回目、2回目、3回目の放飼結果)。供試丸太内には1本あたり平均2.5頭のカミキリ幼虫が存在していたが、寄生を受けたのは合計6頭のみで、寄生率は全体で8%にとどまった。グラフに示した原因不明の死亡個体は、噛み合いによるものか、あるいは寄生したホソカタムシが摂食途中で死亡したものと考えられる。野外の寄生はほとんどが材内の老熟幼虫あるいは蛹に対して行われるが、この実験では材内幼虫に対する寄生は非常に少なく、ほとんど樹皮下幼虫に対するものであった。

孵化幼虫放飼試験の結果を図-1下に示した。一部の丸太は供試期間が6~7月に及んでいたため、材内のカミキリには蛹化した個体と、既に羽化したものも2個体見られた。平均して丸太1本あたり2.1頭のカミキリが穿入していたが、成虫放飼に比べて寄生率は高く、全体で57%に達した。放飼した合計100個体の孵化幼虫の内35個体が寄生に成功した。

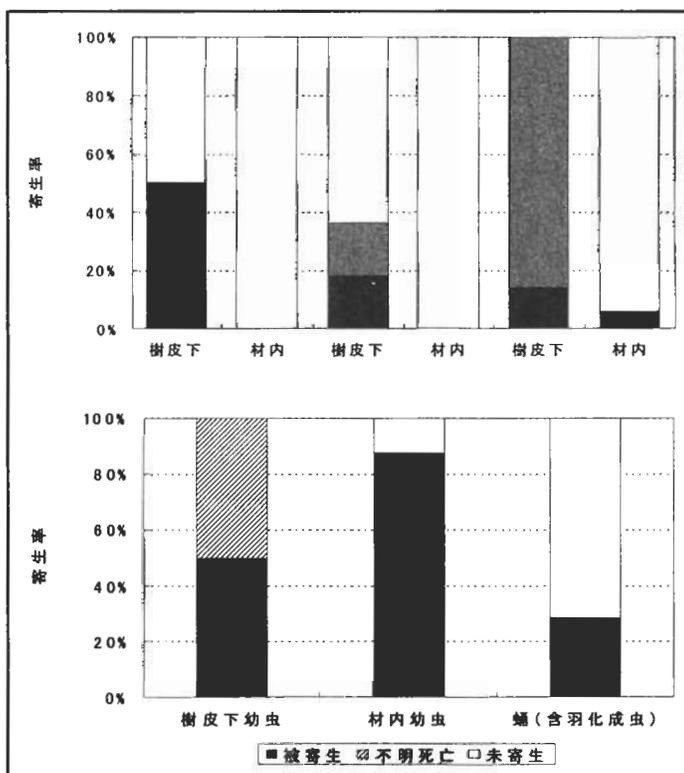


図-1 サビマダラオオホソカタムシ成虫(上)および孵化幼虫(下)放飼試験による、マツノマダラカミキリ丸太穿入個体に対する寄生率

③ 野外網室内における放飼試験

割材調査の結果を図-2に示した。放飼丸太14本におけるホソカタムシ寄生率は全体で49.7%であった。またこれらの丸太におけるカミキリの生存率(蛹室を形成した個体の内、生存あるいは羽化脱出した個体の占める割合)は45.9%と、対照区2本の生存率96.4%より明らかに低かったことから、ホソカタムシにはカミキリの天敵としての有効性が認められる結果となった。

丸太ごとの寄生率は最高 100 %、最低 0 % とばらつきが大きかった。5 月中旬までに放飼した丸太では、寄生を受けたカミキリはすべてが幼虫であった。5 月下旬の放飼では蛹の割合が高くなり、成虫で寄生を受けたものも現れた。したがって 5 月の終わりに放飼した場合は、丸太内のカミキリがかなりの割合ですでに羽化していた可能性がある。

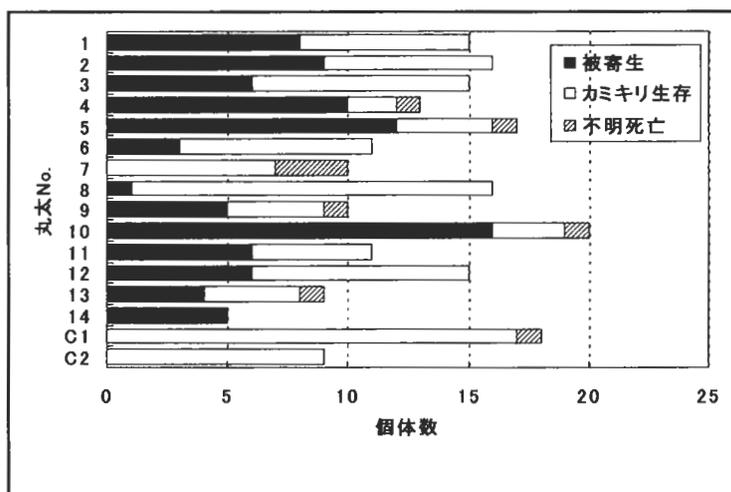


図-2 サビマダラオオホソカタムシ放飼個体の寄生状況 (全体の寄生率は49.7%。マツノマダラカミキリ生存率は放飼木全体で45.9%、対照区(C1、C2)で96.4%)

#### ④ 関西支所構内における野外放飼試験

結果を図-3に示した。10本の供試木すべてにおいてカミキリ幼虫、蛹および成虫がホソカタムシの寄生を受けていた。寄生率は平均 34.8 % (供試木ごとの最高 69.0 %、最低 6.3 %) であった。カミキリの生存率は平均 55.7 %、(供試木ごとの最高 87.5 %、最低 19.0 %) であった。一方ホソカタムシ成虫を放飼しなかった供試木では、放飼木から数mしか離れていないにもかかわらず、樹幹内のカミキリは寄生を受けていなかった。

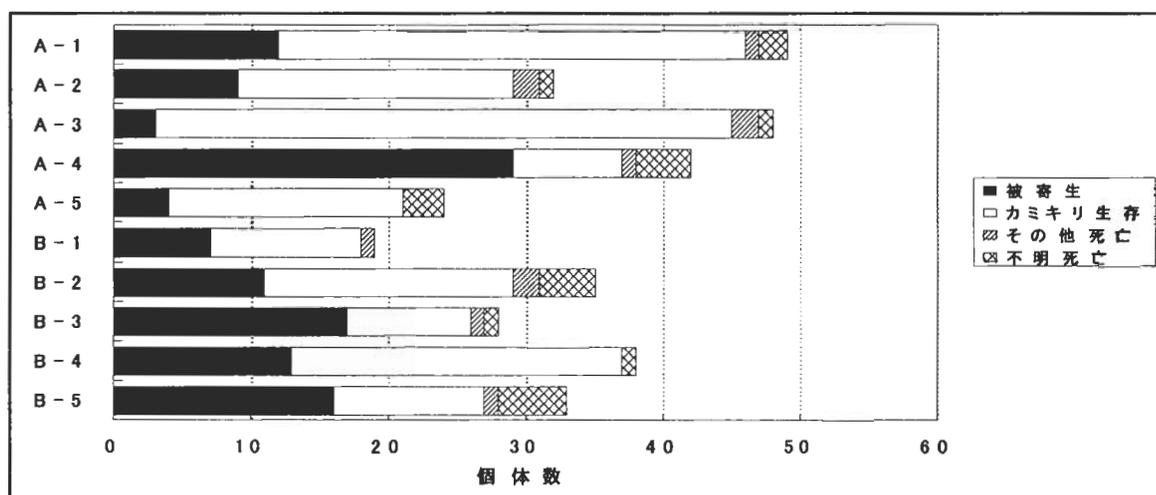


図-3 サビマダラオオホソカタムシ放飼木における調査結果(数字は各供試丸太における寄生率(%). 全体の寄生率は35%。マツノマダラカミキリ生存率は全体で56%)

#### エ 考察

##### ① 岡山県内における野外枯死樹幹内の寄生率の調査

本調査ではホソカタムシの寄生率が調査期間を通じて上昇しており、網室内での幼虫の寄生時期は、カミキリの羽化脱出時期とほぼ一致していた。したがってホソカタムシは、オオコクヌストおよびキツキ類による捕食の後で、最終的な密度調節要因として働くことが明らかになった。

## ② 実験室内における放飼試験

成虫放飼実験において寄生率の低かった原因としては、成虫放飼の期間が2週間と短かったために産卵する個体が非常に少なかったか、あるいはカミキリの越冬前の幼虫が何らかの理由で寄生を受けにくい、いずれかによると推測される。孵化幼虫の放飼では、成虫放飼とは異なり材内の幼虫が高い率で寄生されていたことから、樹皮表面に放したホソカタムシの孵化幼虫は自力で材内蛹室まで到達し、寄生したことが明らかである。

## ③ 野外網室内における放飼試験

丸太ごとの寄生率にばらつきが生じた原因としては、①ホソカタムシ室内飼育成虫の産卵数は5月中旬までは比較的少なかったため、この時期までに放飼できた供試丸太は全14本の内3本のみであったこと、②ホソカタムシは5月下旬から産卵ピークを迎えたため、残り11本の供試丸太には5月下旬に放飼したものの、カミキリ成虫の脱出開始が6月初旬であったため、放飼直後にカミキリの脱出が始まった丸太もあったこと、③カミキリの脱出が早く行われた丸太では、寄生率が低い傾向にあったということが考えられる。以上のことから、今回採卵したホソカタムシ飼育成虫の産卵ピークが供試丸太内のカミキリを効率よく利用するにはやや遅く、今後は飼育個体の温度条件を調節するなどして、必要な時期に多くの卵が得られるような飼育法を確立する必要があるものと考えられた。

## ④ 関西支所構内における野外放飼試験

無放飼木において寄生が認められなかったことから、ホソカタムシ成虫が野外放飼期間中にほとんど移動しなかったことが推測される。また本試験で放飼したホソカタムシ成虫のうち、放飼以前に産卵を開始した個体は全体の約30%であった。したがって野外放飼後も産卵しない個体が存在したため、寄生率にばらつきが生じたものと考えられる。本試験では成虫の放飼期間を4月下旬からの1カ月間としたが、成虫の野外での活発な移動および産卵のために必要な気温に達していなかったものと推定される。したがって供試木の回収時期をさらに1カ月ほど遅らせる必要があったものとする。

## オ 今後の問題点

今回行った一連の予備放飼試験で、ホソカタムシがカミキリに対して有効な天敵であることを示すことができた。しかし岡山県内における野外調査では、最終的に寄生率が80%前後まで達していたものの、放飼試験ではそれを再現するには至らなかった。その原因として、寄生に適した寄主の発育段階と放飼のタイミングが完全に一致していなかったことと、成虫の野外での産卵に必要な温度条件が把握されていなかったことをあげることができる。今回の調査でホソカタムシ成虫は4～5月の気温上昇とともに産卵を開始することが明らかとなった。以上の結果を踏まえて、今後は滋賀県内に設定した試験地内での放飼試験を行う予定である。

## カ 要約

ホソカタムシを用いたカミキリ防除技術開発の前段階として、分布地である岡山県内での調査および実験室、野外網室内と関西支所構内野外での放飼試験を行った。岡山県内の被害地ではアカマツ枯死木樹幹内のカミキリの54%が捕食寄生を受けていた。実験室内での放飼試験では、成虫を放飼した場合の寄生率は8%と低かったが、孵化幼虫を放飼した結果、寄生率57%とな

った。強制産卵丸太を用いた野外網室内での卵放飼試験では、カミキリ全体の 50 %が寄生を受けたが、放飼時期の遅い丸供試太では寄生率が低くなる傾向があった。関西支所構内での強制産卵木を用いた成虫の野外放飼試験では、放飼木における寄生率が 35 %で、放飼木から無放飼木への成虫の移動は認められなかった。以上の結果から、ホソカタムシがカミキリに対して有効な天敵であることが示された。

#### キ 引用文献

- 1) 井上悦甫 (1993) マツノマダラカミキリの天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシについて、森林防疫、42(9)、7-11.
- 2) 岡本安順 (1999) マツノマダラカミキリの天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシの寄生状況と生態調査、森林応用研究、8、229-232.
- 3) 竹常明仁 (1982) マツノマダラカミキリの天敵サビマダラオオホソカタムシ、森林防疫、31(12)、6-8

(浦野忠久)

## 第2章 生理活性物質による防除法の確立

### 1. マツノザイセンチュウの脱皮誘導に関する化学的要因とその化学構造の解明

#### ア 研究目的

マツノザイセンチュウはマツノマダラカミキリによって伝搬されるための分散型4期幼虫と餌不足などの環境の悪化に耐える分散型3期幼虫との2形態（写真-1）を分散型幼虫に持つ特徴を有している。分散型4期への変態を阻止することによってマツ材線虫病の被害軽減技術を開発するためにこの生態的特徴に関わる化学的要因を明らかにする。

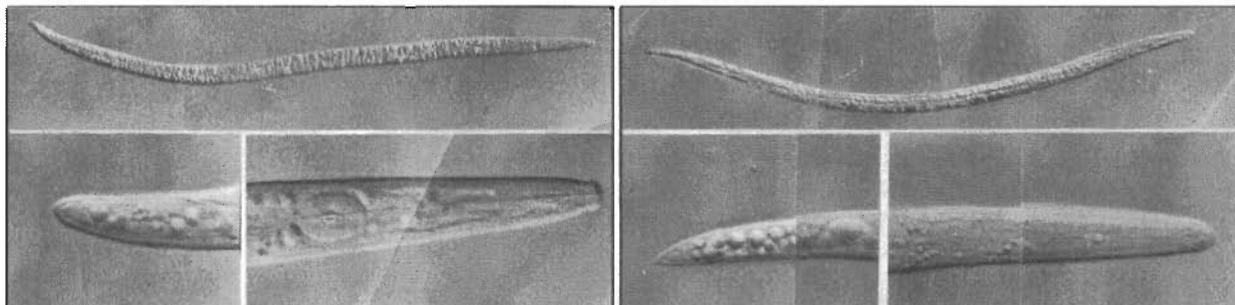


写真-1 分散型3期幼虫（左）と4期幼虫（右）

#### イ 研究方法

PDAに酵母抽出物を加えた培地に、*Contortylenchus genitalicola*から分離された微生物とマツノザイセンチュウ(T-4)を接種し出現した分散型3期幼虫を含む線虫を供試線虫として生物検定を行った。サンプルをペーパーディスクに含浸させ風乾後供試線虫と管瓶に入れ誘導された分散型4期幼虫数の割合を分散型幼虫誘導率とした。

枯損マツから得たマツノマダラカミキリ老熟幼虫または強制産卵させた後人工飼料で飼育したマツノマダラカミキリを羽化させ生じた蛹殻を有機溶媒で抽出して分散型4期幼虫誘導物質のサンプルとした。抽出溶媒としての適性をヘキサン、酢酸エチル、メタノールの間で検討した。

供試サンプル量を変えて分散型4期幼虫誘導能を比較した。

ヘキサン抽出物をシリカゲルカラムで精製し生物検定に供した。精製用溶出溶媒には、ヘキサンに酢酸エチルを0、1、5、30%になるよう加え、最後に酢酸エチルで溶出した。

#### ウ 結果

抽出溶媒としてはヘキサンが適していた。

分散型4期幼虫誘導能の確認は蛹殻0.5頭等量で可能であった。

分散型4期幼虫誘導活性はシリカゲルカラムから酢酸エチルで溶出される画分に認められた。

表-1 シリカゲルカラムにより精製したヘキサン抽出物の分散型4期幼虫誘導活性

画分	溶出溶媒	誘導活性
1	ヘキサン	-
2	1%酢エチ/ヘキサン	-
3	5%酢エチ/ヘキサン	-
4	30%酢エチ/ヘキサン	-
5	酢エチ	+

## エ 考察

マツノザイセンチュウ分散型4期幼虫誘導活性物質はシリカゲルカラムから酢酸エチルで溶出されることから化学的に極性な性質を持つ物質と結論できる。

Ishibashi and Kondoが1977年にマツノザイセンチュウ分散型4期幼虫の出現はマツノマダラカミキリの発育ステージと関係があるとした指摘<sup>1)</sup>は、*Monochamus* 属に共通で成虫の羽化と関連する物質が関与するとの仮定<sup>2)</sup>を導き出したが化学的な研究は行われていなかった。ヘキサンで抽出されてシリカゲルカラムから極性溶媒を用いて溶出可能という結果は、物質関与を証明したものである。

## オ 今後の問題点

試料抽出に必要なマツノマダラカミキリ幼虫の飼育・採集が研究推進の制限要因となり分散型3期幼虫を分散型4期幼虫へ誘導する化学的要因の化学的特性は明示できたが、化学構造の決定には至らなかった。

環境に配慮したマツ材線虫病防除技術の開発ならびにマツノザイセンチュウの生理・生態的特性解明という観点からは重要な研究であり、次年度からは一般研究費で研究を継続する。試料調製に必要な飼育資材や採集補助者に要する研究費の増額が必要。

## カ 要約

マツノザイセンチュウ分散型3期幼虫から4期幼虫への誘導はマツノマダラカミキリ蛹殻からヘキサンで抽出され、シリカゲルカラムから酢エチで溶出される物質によってなされる。

## キ 引用文献

- 1) Ishibashi, N., and E. Kondo (1977) Occurrence and survival of the dispersal forms of pine wood nematode, *Bursaphelenchus lignicolus* Mamiya and Kiyohara, Appl. Entomol. Zool., 12, 293-302
- 2) Necibi, S. and M. Linit (1998) Effect of *Monochamus carolinensis* on *Bursaphelenchus xylophilus* dispersal stage formation, J. Nematol, 30, 246-254

(中島忠一)

## 2. 後食期マツノマダラカミキリ成虫の誘引剤の開発

### ア 研究目的

近年、環境調和型の害虫防除技術の開発が重要な研究ニーズとなっており、マツ材線虫病に対する防除においても従来の薬剤による防除から天敵類や生理活性物質を利用した生物学的防除に転換され、現在、天敵微生物ポーベリア・バッシアナを利用した駆除法がまもなく実用化される。これまで天敵昆虫オオコクヌスト、アリガタバチまたは、性フェロモンの利用も検討されたが、実用化には至らず、今のところアカゲラを利用した幼虫駆除やカイロモン（ $\alpha$ -ピネン、エタノール）を誘引剤とした成虫誘引トラップ（商品名：マダラコール）が実用化され、現場で利用されている。

カイロモンを利用した成虫誘引トラップは、産卵期のマツノマダラカミキリを誘殺し、翌年のマツノマダラカミキリ成虫密度を下げるのが主たる目的<sup>1)</sup>であって、病原微生物マツノザイセンチュウの健全木への伝播を阻止するものではない。そこで、マツノザイセンチュウの伝播を担う後食期のマツノマダラカミキリ成虫を誘引する生理活性物質を探索するため、主に健全マツの匂い成分であるモノテルペン炭化水素の後食期マツノマダラカミキリ成虫に対する誘引効果について検討することとした。

### イ 研究方法

6種類のモノテルペン炭化水素および2種類のパインニードル油を表-1に示すような含有量で調整し、一定量を脱脂綿にしみ込ませて側面に直径2 mmの孔を4カ所あけたプラスチックカップ（容量50ml）に入れ、マダラコール用の誘引器にセットした。

表-1 供試した誘引剤の成分および含有量（100g中）

No.	誘引剤名	成分	含有量
①	A × 1	$\alpha$ (-)-pinene	14.566 g (98% purity)
		Camphen	0.45 g
		$\beta$ -pinene	2.65 g
		$\beta$ -myrcene	2.4 g
		Limonene	0.775 g
		$\beta$ -Phe11andrene	5.11 g (87.5% purity)
②	A × 2	①の2倍	
③	B × 1	$\alpha$ (-)-pinene	14.566 g (98% purity)
		Camphen	0.4 g
		$\beta$ -pinene	4.1 g
		$\beta$ -myrcene	2.275 g
		Limonene	0.475 g
		$\beta$ -Phe11andrene	3.69 g (87.5% purity)
④	B × 2	③の倍量	
⑤	A - $\beta$ × 2	$\beta$ -Phe11andrene	10.22 g
⑥	B - $\beta$ × 2	$\beta$ -Phe11andrene	7.38 g
⑦	Fr-04	Pine-needle Oil	117.0 g
⑧	Fr-08	Pine-needle Oil	110.0 g
⑨	C-1	$\alpha$ -pinene	29.0 g
⑩	C-1/2	$\alpha$ -pinene	29.0 g

誘引試験地は、独立行政法人森林総合研究所千代田試験地の0.3haのアカマツ林で、任意にマツを選んで各化合物をセットした誘引器をできるだけ高所の枝に吊り下げ、後食期のマツノマダ

ラカミキリ成虫の誘引数を調査した。調査期間は、マツノマダラカミキリ成虫羽化脱出期間の6月初旬～8月下旬で、約1週間毎にトラップ内に捕獲された成虫数を数えた。対照として産卵期のマツノマダラカミキリ成虫の誘引トラップを一器同様に吊り下げた。なお、トラップの水は、適宜つぎたした。

### ウ 結果

モノテルペン炭化水素類を誘引源としたトラップによる後食期のマツノマダラカミキリ成虫の誘引個体数は、表-2に示すようにきわめて少なく、6種のモノテルペン炭化水素混合物の単濃度区で3頭、 $\beta$ -フェランドレン区に2頭のみであった。これらの誘引捕獲個体は、誘引試験地の中には被害木は存在せず、マツノマダラカミキリ成虫の発生源はないことから、試験地周辺の被害林分から飛び込んできたものと考えられる。

表-2 マツノマダラカミキリ成虫の捕獲数

No.	誘引剤名	調査月日						
		6/17	6/26	6/29	7/14	7/27	8/8	8/21
①	A×1					2♀1♂		
②	A×2							
③	B×1							
④	B×2							
⑤	A- $\beta$ ×2				1♂			
⑥	B- $\beta$ ×2					1♀		
⑦	Fr-04							
⑧	Fr-08							
⑨	C-1							
⑩	C-1/2							

以上のことから、モノテルペン炭化水素による後食期のマツノマダラカミキリ成虫に対する誘引効果はモノテルペン炭化水素混合物および $\beta$ -フェランドレンに認められたものの、その誘引力は低いものと判断された。しかしながら、10月以降に試験地内の枯損調査を行ったところ、モノテルペン炭化水素混合物および $\beta$ -フェランドレンの誘引トラップを吊り下げたマツの周囲10m以内のマツに被害が集中していたことが判明した。

このことから、モノテルペン炭化水素混合物および $\beta$ -フェランドレンの濃度を調整することによって、後食期のマツノマダラカミキリ成虫を誘引する効果をあげることが可能であると判断された。

なお、今回の誘引試験において7月下旬以降、マダラコール（捕獲総数：35頭）以外のこれらの誘引トラップに成虫は捕獲されなかったことから、表-1に示した $\alpha$ -ピネン以外のモノテルペン炭化水素類は産卵期のマツノマダラカミキリ成虫を効果的に誘引しないと考えられた。

### エ 考察

後食期のマツノマダラカミキリ成虫が6種のモノテルペン炭化水素混合物や $\beta$ -フェランドレンに誘引されることについては、Kim et al. による室内実験によって確認されているが<sup>2)</sup>、野外

での誘引効果については、本実験が最初である。成虫が捕獲されたモノテルペン炭化水素混合物や $\beta$ -フェランドレンでは、捕獲頭数は少なく、これら化合物に後食期のマツノマダラカミキリ成虫を誘引する効果があるという結果は得られなかったが、これらの化合物を誘引源として吊り下げたマツの周辺のマツが集中して枯死した事実から推定すると、これらの化合物には誘引効果はあるが、誘引源の放出量かまたは濃度がトラップまで成虫を誘引するまでには達していなかったと考えられる。そのため、トラップの周辺のマツまで成虫が飛来し、そこで後食し、マツノザイセンチュウを伝播したことで、周辺マツが集中して枯死したと判断するのが妥当であろう。

#### オ 今後の問題点

後食期のマツノマダラカミキリ成虫に対する誘引効果が認められた6種のモノテルペン炭化水素および $\beta$ -フェランドレンについて、誘引効果が最大となる放出量または濃度を決定することが今後の最も重要な問題点であろう。なお、 $\beta$ -フェランドレンは、入手が困難な上、高価であるため誘引剤として利用することは妥当ではないと考える。

#### カ 要約

モノテルペン炭化水素類の後食期のマツノマダラカミキリ成虫に対する誘引効果を検討した。その結果、6種のモノテルペン炭化水素混合物( $\alpha$ -ピネン、カンフェン、 $\beta$ -ピネン、 $\beta$ -ミルセン、リモネン、 $\beta$ -フェランドレン)および $\beta$ -フェランドレンに成虫誘引効果が認められた。

#### キ 引用文献

- 1) Fauziah, B., Hidaka, T. & Tabata, K. (1991): The reproductive behavior of *Monochamus alternatus* Hope (Coleoptera: Cerambycidae), *Appl. Entomol. Zool.*, 22, 272-285.
- 2) Kim, G., Takabayashi, J., Takahashi, S. & Tabata, K. (1992): Function of pheromones in mating behavior of the Japanese pine sawyer beetle, *Monochamus alternatus* Hope, *Appl. Entomol. Zool.*, 27 (4), 489-497

(田畑勝洋)

## 第3章 松林の抵抗性誘導技術の開発

### 1. 成木の抵抗性誘導技術の開発

#### ア 研究目的

マツ材線虫病の病原生物であるマツノザイセンチュウ（以下、センチュウと略す）の病原力には大きな変異があることが知られている<sup>1, 5)</sup>。そして、病原力の弱いセンチュウを事前に接種したマツは、後に病原力の強いセンチュウを接種しても枯死しないことが報告された<sup>2, 3, 4)</sup>。この現象は、病原力の弱いセンチュウを接種したマツにマツ材線虫病に対する抵抗性が誘導された（誘導抵抗性が発現した）と考えられている。マツの誘導抵抗性に関する研究は、主に苗畑に成育している苗木を用いて強病原力センチュウを接種することで行われてきた。誘導抵抗性を利用したマツ材線虫病の生物的防除法を開発するために、本研究では、林地に成育している成木のマツで誘導抵抗性が発現するかどうか、また、マツ材線虫病の自然感染に対して誘導抵抗性が発現するかどうか明らかにすることを目的とする。

#### イ 研究方法

##### ① 実験1

実験開始時にマツ材線虫病の発生していない茨城県七会村の30年生アカマツ林を試験林とした。試験林のマツに対して弱病原力センチュウを50,000頭、20,000頭あるいは全く接種しない実験区を設け、それぞれに対して強病原力センチュウ10,000頭の接種の有無を組み合わせ、合計6実験区を設けた（表-1）。弱病原力センチュウの前接種は平成9年6月12日に、強病原力センチュウの後接種は同年7月9日に行った。センチュウの接種は、鉋で樹幹に傷をつけ所定の数に調整したセンチュウ懸濁液0.5mlをマイクロピペットで滴下して行った（写真-1）。平成9年10月、平成10年6月、平成11年6月及び平成12年6月にマツの生死を確認した。

表-1 実験区の設定

実験区	前接種頭数*	後接種頭数**	供試本数
5万弱	50,000	なし	16
2万弱	20,000	なし	16
無接種	なし	なし	20
5万弱+1万強	50,000	10,000	16
2万弱+1万強	20,000	10,000	16
1万強	なし	10,000	15

\*分離株：OKD-1

\*\*分離株：Ka-4

##### ② 実験2

マツ材線虫病が発生している茨城県千代田町のアカマツ、クロマツ混交林（樹齢約10-30年）を試験林とした。平成10年5月27日に試験林のおよそ半数のマツに弱病原力センチュウ（分離株：OKD-1）20,000頭を接種した。接種は、鉋で付けた切り口にセンチュウ懸濁液0.1mlを滴下して行った。残りのマツには何も接種しなかった。平成11年5月にマツの生死を確認し、5月18

日に前年弱病原力センチュウを接種して生き残ったマツに前年と同様に弱病原力センチュウを接種した。平成 12 年 5 月にマツの生死を確認し、5 月 15 日と 6 月 6 日に前年弱病原力センチュウを接種して生き残ったマツに弱病原力センチュウをそれぞれ 30、000 頭ずつ接種した（合計 60、000 頭）。接種は、直径 4mm のドリルで開けた穴にセンチュウ懸濁液 0.1ml を滴下して行った。平成 13 年 5 月にマツの生死を確認した。下草刈り作業中に誤って刈り払われた数本のマツについては、結果から除外した。



写真-1 センチュウのマツへの接種方法。鉋で樹幹に傷を付け（左）、傷に所定の頭数に調整したセンチュウ懸濁液をマイクロピペットで接種する。

## ウ 結果

### ① 実験 1

試験に用いたマツの生存率を図-1に示した。弱病原力センチュウだけの接種では、マツはほとんど枯死しなかった。弱病原センチュウの接種後に強病原力センチュウを接種した木の生存率は、強病原力センチュウだけを接種した木の生存率より高かった（特に平成 9 年 10 月の観察時）。しかし、弱病原力センチュウを 20,000 頭接種した後に強病原力センチュウを接種した木の生存率は、接種翌年の以降の観察では、強病原力センチュウだけを接種した木の生存率とほとんど同じであった。弱病原力センチュウを 50,000 頭接種した後に強病原力センチュウを接種した木の接種 3 年後（平成 12 年）における生存率は、約 50%であった。この生存率は、同時期に観察した強病原力センチュウだけを接種した木の生存率（約 25%）のおよそ 2 倍であった。なお、本試験林の周辺のマツ林で平成 11 年にマツ材線虫病の発生を確認し、平成 12 年には本試験林内でもマツ材線虫病の発生を確認した。

### ② 実験 2

試験に用いたマツの生存率を図-2に示した。平成 11 年の観察では、弱病原力センチュウを接種した木の生存率は、無接種の木の生存率より高かった（ $\chi^2$  検定、 $p < 0.05$ ）。しかし、平成 12 年、13 年に観察したマツの生存率は、弱病原力センチュウの接種の有無に関わらず同じであった（ $\chi^2$  検定、 $p > 0.05$ ）。

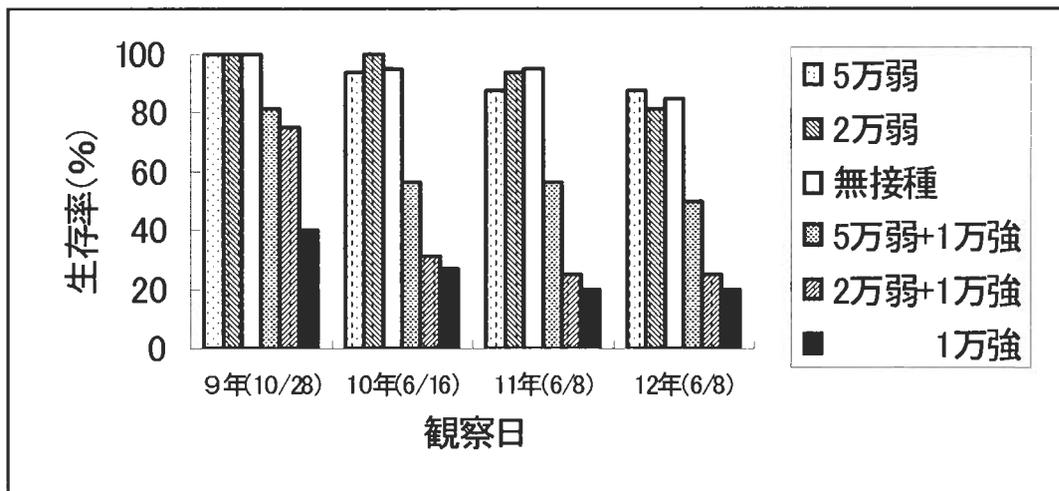


図-1 30年生アカマツの生存に対する強弱病原力センチウの接種の影響。Kosaka et al. (2001a) にデータを追加。

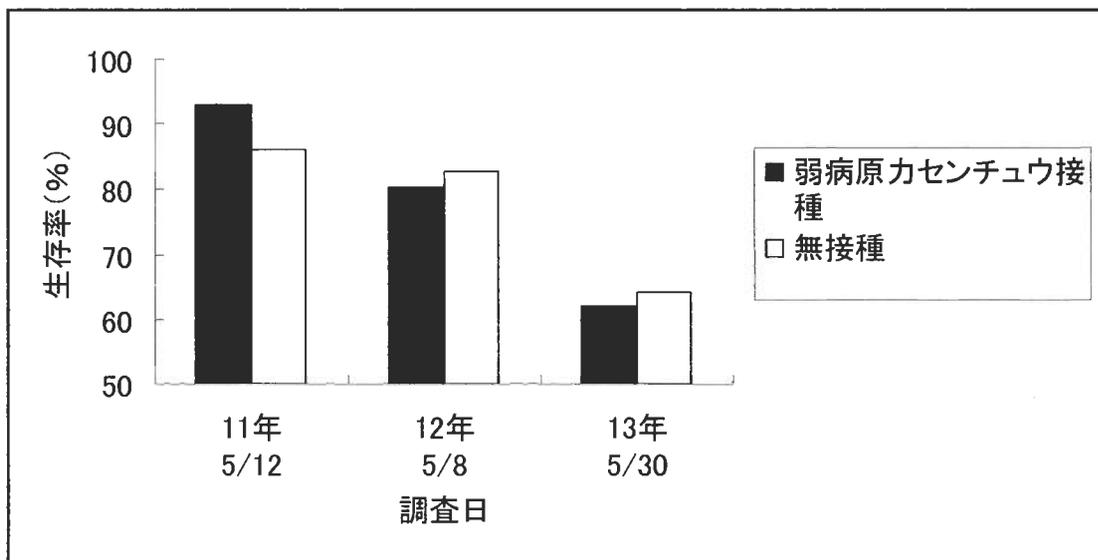


図-2 アカマツ、クロマツ混交林におけるマツ材線虫病の自然感染に対する弱病原力センチウ接種の影響。nは供試本数を示す。Kosaka et al. (2001b) にデータを追加。

### エ 考察

弱病原力センチウの接種により強病原力センチウの後接種あるいはセンチウの自然感染に対してマツの生存率が高くなる場合があることが明らかになった。しかし、マツの生存に対する弱病原力センチウの接種の影響は、時間とともに低下する場合や、見られない場合もあった。これらから、マツの成木やマツ材線虫病が自然感染する条件においても、弱病原力センチウの接種により誘導抵抗性は発現するものの、発現の程度は不安定あるいは不十分であったと考えられる。

### オ 今後の問題点

苗木を使った試験では、マツの誘導抵抗性の発現の程度は、弱病原力センチュウの接種方法で変わることが示されている<sup>3, 4)</sup>。また、成木においては、弱病原力センチュウの分離株によって誘導抵抗性の発現の程度が変わることも示されている<sup>6)</sup>。これらから、現在保有している弱病原力センチュウの分離株を利用してより高い程度に誘導抵抗性が発現する接種方法を探索することと、より効果的に誘導抵抗性を発現させるセンチュウの分離株を探索することが今後の問題点である。

### カ 要約

弱病原力の接種によるマツのマツ材線虫病に対する誘導抵抗性は、成木やマツ材線虫病の自然感染する条件でも発現するものと思われた。誘導抵抗性の発現の程度をより高める接種方法やセンチュウ分離株を探索することが今後の課題である。

### キ 引用文献

- 1) 清原友也 (1977) マツノザイセンチュウ系統間の増殖および病原性の比較. 日林九州支論、30、241-242
- 2) 清原友也 (1981) マツノザイセンチュウ弱病原線虫の前接種による強病原性線虫の加害性の抑制 (予報)、92回日林論、371 - 373.
- 3) Kiyohara, T (1984) Pine wilt resistance induced by prior inoculation with avirulent isolates of *Bursaphelenchus xylophilus*, Proceedings of the United States-Japan seminar: The resistance mechanisms of pines against pine wilt disease, 178-184
- 4) 清原友也 (1989) マツ材線虫病の病原学的研究、林試研報、353、127-176
- 5) Kiyohara, T and Bolla, RI (1990) Pathogenic variability among populations of the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, Forest Science, 36, 1061-1076
- 6) Kosaka, H, Aikawa, T, Ogura, N, Tabata, K and Kiyohara, T (2001a) Pine wilt disease caused by the pine wood nematode: the induced resistance of pine trees by the avirulent isolates of nematode, European Journal of Plant Pathology, 107, 667-675
- 7) Kosaka, H, Aikawa, T, Ogura, N, Tabata, K and Kiyohara, T (2001b) Induced resistance of pine trees against pine wilt disease by avirulent nematode inoculation, IUFRO World Series Vol. 11. Protection of world forests from insect pest: Advances in research. Papers presented at the XXI IUFRO World Congress, August 2000, 181-184

(小坂 肇)

## 2. 菌根菌フロアの誘導技術の開発

### ア 研究目的

マツ枯損がさまざまな観点から解析されてきた。ここでは、罹病虫害を引き起こしやすくする要因の一つとして考えられる樹勢低下を根系からとらえ、特に栄養吸収に貢献する菌根機能の役割を明らかにする。

放置されたマツ林は腐植層が厚くなり、土壌表層に展開する根の発達が悪くなるので、菌根機能を刺激し、根圏環境の活性化を図るのが有効とされ、落ち葉かきや植生管理が試みられてきた。しかし、そのための林分管理はどのように行えばいいのかについては不明なことが多い。菌根菌や菌根（写真-1）の発達様式、生活形態を明らかにすることによってマツ根圏の健全化を図る技術に供する。



写真-1 ニタケ科と思われる菌根の拡大図

### イ 研究方法

#### ① アカマツ林施業が菌根（菌）に及ぼす影響について

茨城県水戸市西北部に位置する関東森林管理局東京分局森林技術センター（61 林班）のアカマツ人工林（32 年生）を対象とした。この地域はすでにアカマツの枯損が進行しており、生残している林分も被害を受けていた。1997 年 5 月にアカマツが生残する平尾根を中心に約 20 × 30m の調査区を 4 カ所に設けた（写真-2）。アカマツ枯損木およびツルや下層植生の整理伐を、次のように行った。プロット A：外生菌根性樹種を残した（アカマツ、アカシデ、クリ）、プロット B：外生菌根性樹種を残した（アカマツ、アカシデ）、プロット C、D：アカマツ以外の外生菌根性樹種を伐採した。各プロットとも下層植生を整理しただけの区と腐植層除去区とに二分した。対照区は各プロット外方約 10m 範囲とした。



写真-2. アカマツ林の菌根掘取り調査

子実体の発生： 各プロット、各処理区ごとに外生菌根菌の子実体発生調査を行った。

施業が菌根に及ぼす影響： 施業後 4 年目に菌根の掘取り調査を行った。菌根の垂直分布は、アカマツに近接した 1 × 1 m 内を 10cm 深さまで 2 cm 間隔、以下 30cm 深さまで 5 cm 間隔でアカマツ根系を、20x20cm 区画で採取した。外生菌根は、短細根状のチップと呼ばれる部位を形成し、形態もさまざま、また野外では未熟、成熟、枯死菌根などあり、膨大な量を短時間に計測することは難しい。チップ数を指標とすることもあるが、問題も多く困難である。ここでは、直径 2mm 以下の細根長と、その細根部位において菌根の発達した塊状部位の長さを区画ごとに積

算した。活性菌根と枯死菌根とを区分け、塊状形成されている菌根のなかでの活性部位を取り出すことは難しい。したがって、ここでの菌根とは数年間の蓄積ととらえる。

## ② 立地環境と菌根分布

アカマツの生育を指標とした菌根分布： 上記プロット周辺域のアカマツ林において、斜面間や位置の違いについて菌根分布調査を行った。上記設定した各プロットに隣接した平尾根2カ所、平尾根から斜面にわずかに下った上部2カ所、つぎに隣接した尾根のアカマツの生育不良地で同じく行い、計8カ所で掘取り調査をした。アカマツの根系を0.5(樹木周囲方向) x 1(放射方向) x 0.5(深さ) mで、土壌深さ0-20cm、20-50cmに分け掘り取った。根系は、菌根が形成される直径2mm以下の細根のみ対象とした。菌根を塊状(クラスター)に形成する根系を一定の基準(表-1、2)で分別し比較した。

斜面位置によるアカマツの菌根分布： アカマツの根系調査を1 x 1 x 0.5(深さ) mで掘取り外生菌根の評価を行った。森林技術センター(258林班)における標高差約70mの斜面上部、中部及び下部において、アカマツ30年生を各3本、各個体の周囲2カ所で掘り取った。掘取りは、樹幹から1m離れた位置で、表層から約20cmまで、及び20-50cmまでの2画分とした。根系は、上記同様菌根クラスターによって比較した。

## ③ 外生菌根菌感染苗の生産

菌根菌の増殖やアカマツ林再生のための感染苗の生産工程を改善するため、アカマツを宿主とするヌメリイグチを用いて検討した。液体培地で増殖、固体培地での増殖・固定、そして3万本規模の播種床での4ヶ月無菌根苗での接種・感染を行った。また、数年生の大型苗への非感染苗を形成し、その維持管理を行った。

## ウ 結果

### ① アカマツ林施業が菌根(菌)に及ぼす影響

子実体発生：プロット内の外生菌根菌(写真-3、4)は、施業した年に対照区より処理区で多く発生した。その後も同様の傾向が続いた。しかしながら、全体として発生数の明らかな増加は認められなかった。発生種は、*Amanita*、*Cortinarius*、*Lactarius*、*Russula*、*Boletus*、*Tylopilus*、*Suillus*の各属が占めた。近接したプロットであってもプロットの優占種に共通種が少なく、また子実体量にも開きがあった。下層植生整理伐区では全区とも増加はみられなかった。

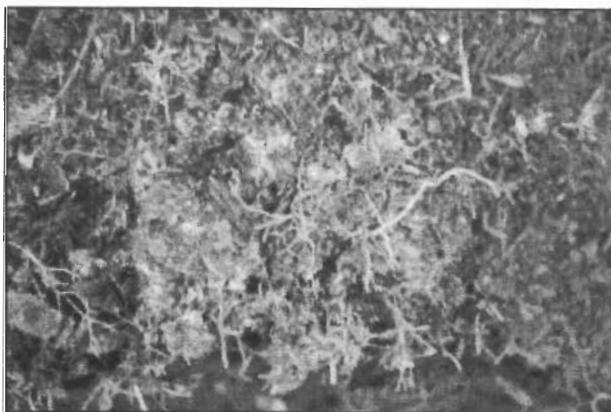


写真-3 腐植層に広がる外生菌根菌糸



写真-4 深さ約20cmに広がる外生菌根

腐植を除去した箇所では発生量が少なかったが、B層生息菌としてA区ではニガイグチモドキ (Tn)、D区では同菌とコシロオニタケ(Ac)が発生した。AcはD区の下層植生整理伐区でも発生した。A-D区における対照区での高頻度種は *Amanita*、*Cortinarius*、*Lactarius*、*Boletus* の各属であったが、各区間での共通種は少なかった。

施業が菌根に及ぼす影響： 下層植生整理伐区、腐植層除去区及び無処理区を比較したところ、施業の違いによって4年後には細根量、菌根量、そして菌根化率に変化がみられた(図-1)。菌根化率はいずれも土壌表層が高かった。土壌表層の細根量、菌根量は、下層植生の整理を行い林床攪乱しなかったところで減少し、腐植除去区では回復しなかった。一方、土壌深部では、対照区ではピークがなく、下層植生整理伐区では深部で小さなピークがあり、腐植層除去区でははっきりとしたピークがあった。

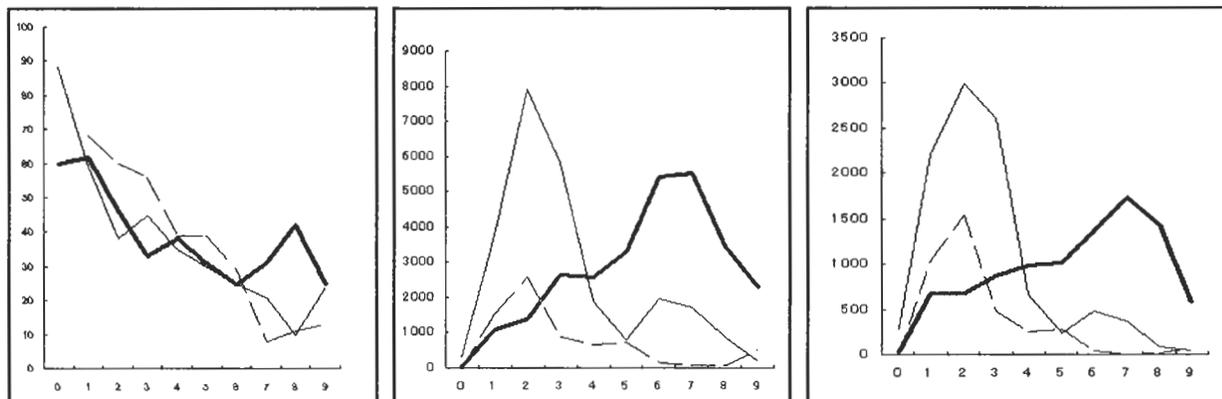


図-1 アカマツ林施業4年後の外生菌根の垂直分布  
Y軸(左:菌根化率、中:細根長mm、右:菌根部位長mm)  
X軸(土壌深さ 0:腐植層、1-5:2cm深さの間隔、6-9:5cm深さの間隔、)  
細実線:無処理区、破線:下層植生整理伐区、太実線:腐植層除去区

## ② 立地環境と菌根分布

アカマツの生育を指標とした菌根分布： 各掘取り区の土壌をみると(表-1)、アカマツの生育がよいNo.1-4、アカマツの生育が悪いNo.5-8それぞれA<sub>1</sub>層とB層の厚さにはやや差がみられ、前者で厚い傾向がみられた。

表-1 アカマツ枯損地における生残木周辺の土壌層位(cm)

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
A <sub>0</sub> 層	2	5	5	6	2	2	3	3
A <sub>1</sub> 層	7	6	8	6	3	7	3	3
B層	31	28	14	20	27	31	10	12

No. 1、2: 平尾根平地上でアカマツ枯損の激害地、アカマツの生育良好

No. 3、4: No. 1、2近くの斜面上部、アカマツの生育中程度、北西斜面

No. 5、6: No. 1-4の隣接尾根、谷まで約10mの斜面下部、アカマツ生育不良、南東斜面および北斜面

No. 7、8: No. 5、6上部の平尾根でやや北東に傾斜、アカマツ生育不良

ここでは、表-2にみるように、2 mm以下の根系の分布を比較した。区画あたり塊状となる菌根クラスター数(b)と菌根を形成している最小太さの根系数(a)の比(b/a)を菌根指標としてとらえると、菌根がよく発達していたのは、根系あたり菌根が多く形成されているNo.3の土壌表層で、一方菌根形成が貧弱になると菌根指標は1に近づいた。おおまかではあるが、アカマツ

の生育のいい場所 (No.1-4) では、土壌表層 (0-20cm) の菌根指標が高く、逆に生育の悪い No.5-8 では土壌の深い場所 (20-50cm) で高い値を示した。ただし、これらは No.7 のように根系数が少ないと特定の根に左右され傾向がみられなくなった。

表-2 アカマツ枯損地における生残木の菌根

plot	土壌 深さcm	< φ 2mm根系		菌根クラスター数* (b)	菌根根系数*(a)	b/a
		本数*	容積ml*			
No. 1	0-20	52	7.6	54	34	1.59
	20-50	43	4.2	24	15	1.60
No. 2	0-20	27	2.5	39	24	1.63
	20-50	30	3.4	12	9	1.33
No. 3	0-20	318	26.7	501	222	2.25
	20-50	22	2.1	32	24	1.33
No. 4	0-20	21	1.4	28	18	1.56
	20-50	13	1.0	24	15	1.60
No. 5	0-20	56	4.3	47	35	1.34
	20-50	198	20.0	159	92	1.72
No. 6	0-20	1	1.0	3	3	1.00
	20-50	65	10.0	35	20	1.75
No. 7	0-20	16	1.4	18	12	1.50
	20-50	0	0	0	0	0
No. 8	0-20	117	11.3	136	99	1.37
	20-50	36	3.1	42	28	1.50

\*本数：掘り出した根の本数、人為的に切っている。参考値

\*容積：すべての対象を直径1.5mmとして計算

\*菌根根系数：菌根が形成されている最小段階の根系で人為的に切れにくい

\*菌根クラスター数：アカマツの菌根は、発達すると塊状になり計数しやすい、未発達もしくは若い菌根部位はまとめて1ポイントとする

表-3 アカマツ菌根の斜面分布

プロット	深さcm	< φ 2mm根系		b*	a*	b/a	
		本数*	容積ml*				
斜面上部	A1	0-20	536	46.3	453	147	3.1
		20-50	217	18.1	61	38	1.6
	A2	0-20	298	20.1	45	27	1.7
		20-50	96	7.7	13	6	2.2
斜面中部	A3	0-20	89	8.5	10	7	1.4
		20-50	67	9.6	7	4	1.8
	B1	0-20	620	22.8	490	128	3.8
		20-50	335	12.1	159	64	2.5
B2	0-20	488	30.4	387	172	2.3	
	20-50	342	19.3	239	99	2.4	
B3	0-20	83	6.1	24	12	2.0	
	20-50	41	3.2	20	13	1.5	
斜面下部	C1	0-20	296	20.2	189	66	2.9
		20-50	45	1.8	18	8	2.2
	C2	0-20	596	43.3	387	81	4.8
		20-50	61	6.5	27	12	2.3
	C3	0-20	333	14.7	209	27	7.7
		20-50	41	1.5	27	5	5.4

各プロットの面積は2m<sup>2</sup>、樹齢は約35年生

斜面位置間の菌根分布の違いははっきりしなかったが、菌根指標はアカマツの生育良好サイト

では 20-50cm 深さより 0-20cm 深さで高く、逆に生育不良サイトでは 20-50cm 深さで高い傾向がみられた。この値は菌根密度に比例すると考えられることからアカマツ根系と菌根分布には相関があるように思われた。これは、生息する外生菌根菌のフロラ特性に影響するものと考えられる。アカマツ菌根の斜面分布： 当該斜面の上部の土壌はごく浅くて母岩が露出し、斜面下部においても、礫が多く堀取りによって、菌根の切断を起こしやすく、やや不良のサンプルであった。アカマツ各個体の 2カ所からの採取はまとめて示した（表-3）。菌根を形成する根系数が抱える菌根指標（b/a）は、斜面上部では土壌表層で平均 2.0、深部で 1.9、斜面中部では土壌表層で 2.7、深部で 2.1、斜面下部では土壌表層で 5.1、深部で 3.3 であった。斜面下部に大きい傾向がみられ、いずれも深いところでは小さな値を示した。上述した、アカマツの生育を指標とした菌根分布と同じく、貧土壌の深部ではこれらの値が肥沃な場所に比べ表層部の値と逆転する傾向がみられた。

### ③ 外生菌根菌感染苗の生産

室内及びポット規模での感染苗の形成はしばしば試みられてきたが、量産されたことはない<sup>2)</sup>。鉱物質土壌で増殖・固定化したヌメリイグチによる感染苗は、播種床での菌体保続を可能とし、かつこの感染苗を用いた苗床への移植によって半年後には、子実体が発生し、土壌でも外生菌糸の発達を認めた。

苗畑で生育した 5-6 年生アカマツ苗を 2月に掘取り、無菌根化して 1年半このままガラス室内で維持した。根系はよく発達し、接種可能な根系を提供することができた。

## エ 考察

### ① アカマツ林施業が菌根（菌）に及ぼす影響

子実体の発生： アカマツを宿主とする外生菌根菌の子実体は、下層植生の整理や腐植層の除去によって施業直後に発生量の違いが認められた。刺激を加えられた直後に子実体形成を促した因子があったと考えられる。しかし、その後発生数の増加傾向はみられなかった。菌根形成は、単一のコロニーであれば早く増殖し子実体形成も行われると思われるが、複雑な競合関係がある林地では単一種の増殖にはタイミングと時間が必要かもしれない<sup>2)</sup>。腐植層除去区での子実体発生は、土壌深部で従前から生活するグループに限定されたものの一部のプロットで増加した。しかし、期間内では土壌表層に新たな種類の発生はなかった。新たな菌根菌の定着にはさらに時間を要すると思われる。土壌表層では、期間内で施業が明らかな子実体の発生数増大や新たな菌種の増加に結びつくことはなかった。

施業が菌根に及ぼす影響： 腐植の除去に伴う細根の消失は、期間内で元に戻ることはなく、これは表層で生息する外生菌根菌の子実体発生が認められなかったことと一致していた。しかし、腐植層除去によって表層に生息する菌類を排除した区の深部土壌では細根量の増加、菌根の増加がみられ活性化が示唆された。一方、施業による土壌表層の菌根の反応はやや異なっていた。4年後では対照区と比べて土壌表層の菌根量が少なかった。施業直後にその一部は消失したかも知れない。今後表層での回復が進むとすれば、時間を要すると考えられる。もしくは、表層環境に応じてこのままであるかもしれない。子実体発生においてもはっきりとした変化は認められていない。いずれにしても下層植生の除去が影響を及ぼしたことは間違いない。プロット内では期間内でアカマツの枯損が進行した。それまでの共生体バランスを一時的に混乱に陥れたことと関わりがあったかもしれない。激変に対しては、いくつもの保健衛生的な支援を行い林分管理に望む

必要があると思われる。ゆっくりとした林相転換や、時間を掛けた施業を行い、大規模で画一的な施業は控えるべきであろう。根系の健全性を保つには環境の激変は大敵と考えたい。

## ② 立地環境と菌根分布

菌根の垂直分布は、アカマツの生育良好地では表層に、不良地では深いところ集中する傾向がみられ、菌根菌の組成に影響するものと考えられた。斜面間や土壌深度の違いは、アカマツの生育に影響すると考えられるので、したがって菌根形成にも大きな要因となると思われる。未熟な土壌や、成熟土壌によって菌種が異なり、また植生遷移に連動するとも考えられる<sup>1, 4)</sup>。アカマツの純林や混交林でのこれら菌種の組み合わせにはいくつもの組み合わせがあると思われ、土壌タイプの違いや長期の観測が必要であろう<sup>3)</sup>。土壌環境は根系のすべてを御するものであり、そしてそこで生活する根も含めた生物相が形成する新たな土壌環境形成には、もっと単純な組み合わせで解析するのも方法であろう。

以上の調査では、菌根と施業や立地環境との関わりに触れたが、短期間での追跡、局所的という危惧があり、一事例ととらえる段階かも知れない。さらに、広域、長期間の試験研究が必要であろう。

## ③ 外生菌根菌感染苗の生産

アカマツ枯損は、共生する外生菌根菌の消失を意味する。アカマツ林の保続には、この共生体の維持が必要であり、これら遺伝資源の保存とその活用技術の高度化が欠かせない。ここでは、実用的な接種・感染技術を試みた。3万本規模で播種から苗生産を行い、播種床での接種・感染から野外の苗床への移植と苗管理までを、また数年生の苗を感染苗にするための管理方法について検討した。接種・感染では固体培地を用いて接種を行った。高額な施設や高度な技術を使わずに実用化を試み、苗床で子実体形成を確認することができた。林地での共生体定着には課題も多いが、大量の苗生産態勢は、野外で実証する上で欠かせない。

また、大型アカマツ苗の根系を接種可能な形態に導くことができたことは、緑化だけでなく子実体生産などその応用を可能とした。

## オ 今後の問題点

従来の施業指針では、地上部への関心がほとんどで根系に比重がかけられていたとはいえない。養分吸収根は土壌表層に集中する。これを破壊することは根系の生理バランスを破壊することになり注意しなくてはならない。立地環境の異なった広域での共生根系のモニタリングを長期間行い、根系を加味した林地管理の検討、また消失したアカマツ林の回復に向けて外生菌根菌の活用技術の改善開発を行う必要がある。

## カ 要約

### ① 施業が菌根の動態に及ぼす影響

放置され、枯損被害が頻発しツルや下層植生の繁茂がみられるアカマツ 32 年生人工林を対象として、一般にアカマツ林の回復に向けて行われる下層植生や林床の整理、ここでは、下層植生の伐採、林床は腐植層の除去を行い、外生菌根（菌）の影響を追った。その結果、期間内では施業によって土壌表層では、明らかな子実体の増加や菌根の増殖は認められなかった。施業という攪乱によって菌根の増殖が盛んになるには、また新たな子実体形成が認められるには、さらに時

間が必要であった。一方、土壌深部では、腐植層除去によっておそらく既存のコロニーが増殖したと思われる子実体や菌根の増加がみられた。

## ② 立地環境と菌根分布

菌根の垂直分布は、アカマツの生育良好地では表層に、不良地では深いところで多い傾向がみられ、菌根菌の組成への影響が考えられた。斜面位置の違いについてもほぼ同様の結果がみられ、斜面上部が貧相で、下部では良好なアカマツの生育を裏付けていた。

## ③ 外生菌根菌感染苗の生産

マツ類や一部の種類の枯損が報じられているが、これらと共生する菌類は宿主の消失と同時に枯死するものが多いと考えられる。菌株の保存や増殖、そして感染苗の生産技術を高める必要があり、接種・感染行程の実用規模を試みた。1種ではあるが、子実体発生を認め、増殖及び苗生産を確認した。

## キ 引用文献

- 1) Okabe, H., Ezaki, T., Marumoto, T. and Yamamoto, K. (1997) Effectiveness of Mycorrhizal Association in Revegetation, J. Agri. Meteorol., 52, 609-612
- 2) 岡部宏秋(2000a) 外生菌根菌の機能利用に向けて、微生物の資材化：研究の最前線（鈴木孝仁ほか編）、ソフトサイエンス社、71-80
- 3) 岡部宏秋(2000b) 植物根系を利用する共生戦略、森林微生物生態学（二井一禎他編）、朝倉書店、41-56
- 4) 岡部宏秋(2002) 森が抱え、森を支える菌根菌、山林、No.1414、32-38

(岡部宏秋)

### 3. マツ枯損激害化に関わる環境要因の効果の解明

#### ア 研究目的

マツ材線虫病の発生、蔓延はマツノマダラカミキリーマツノザイセンチュウ三者の相互作用系の動態に依存する。したがって、環境要因の操作を介してこれらの生物の動態に変更を加えることができれば、これを通じてマツ枯損を抑制することが可能となるかもしれない。このような方策を考える上で、現実に存在する微害林分における激害化阻害要因を探り、その効果を評価することは有効である。

九州地域では、鹿児島県桜島のクロマツ林で材線虫病被害が特異的に少ないことが古くから知られていた。この現象については、従来、火山灰地に生息するクロマツの材線虫抵抗性の高さや火山灰、火山ガスがマツノマダラカミキリの行動に及ぼす影響などを想定した推論がなされてきたが、これを科学的に検証した例はほとんどなかった。本項目では火山灰、火山ガス等の桜島の特殊な環境要因がマツの材線虫病感受性やマツノマダラカミキリの行動を介して材線虫病の発生、蔓延に及ぼす影響を明らかにしようとした。

#### イ 研究方法

##### ① マツノマダラカミキリ生け捕り用トラップとその特性

サンケイ式昆虫誘引器の捕虫容器部分を生け捕り用とするトラップを考案し、その効率をみた。

##### ② 桜島におけるマツノマダラカミキリの生息状況と捕獲虫のマツノザイセンチュウ保持状況

マツノマダラカミキリの発生状況を調査しつつ、捕獲虫のマツノザイセンチュウ保持状況も検討するため、市販のマツノマダラカミキリ用トラップ（サンケイ式昆虫誘引器、黒色）を改良してマツノマダラカミキリ生け捕り用トラップを試作した。このトラップをマツ枯損の少ない桜島と、これに隣接し激しいマツ枯損の見られる薩摩半島、大隅半島に設置し（写真-1）、マツノマダラカミキリの飛来状況を調査するとともに、捕獲虫を破碎、抽出してマツノザイセンチュウの検出を行った。



写真-1 桜島におけるマツノマダラカミキリ誘引捕獲調査

##### ③ マツノマダラカミキリの摂食に及ぼす火山灰の効果

火山灰を付着させたクロマツ切り枝と付着させない切り枝を入れた小容器内にマツノマダラカ

ミキリ成虫を放し、枝に付着した火山灰のマツノマダラカミキリに対する忌避効果、摂食阻害効果を調べた。また、火山灰を付着させたクロマツ切り枝または付着させない切り枝を入れた小容器でマツノマダラカミキリ成虫を個体飼育し、火山灰がマツノマダラカミキリの寿命に及ぼす効果を調べた（写真-2）。



写真-2 火山灰付着クロマツ枝によるマツノマダラカミキリ成虫飼育実験

#### ④ 桜島に自生するクロマツ幼樹の材線虫病感受性

1998年7月15日、桜島南西部烏島の鹿児島大学溶岩実験林内のクロマツ幼樹（5～10年生）に対しマツノザイセンチュウ 10,000 頭ないし 1,000 頭を含む懸濁液、または水（対照）を接種し、以後の病徴（樹脂滲出能および針葉変色）を調査した。

#### ウ 結果

##### ① マツノマダラカミキリ生け捕り用トラップとその特性

サンケイ式昆虫誘引器の捕虫容器に虫の逃亡を防止するためのロートをはめ込む形のマツノマダラカミキリ生け捕り用トラップ（図-1）を考案した<sup>2)</sup>。ロートを装着した容器からのマツノマダラカミキリの1日あたりの逃亡率は約30%であった。夏の晴天時には捕虫容器内の気温が高くなって（45-49℃）捕獲虫が死亡したので、容器の周囲をアルミ фольドで覆うことで温度上昇を抑制しようとしたが、その効果は十分ではなかった<sup>2)</sup>。

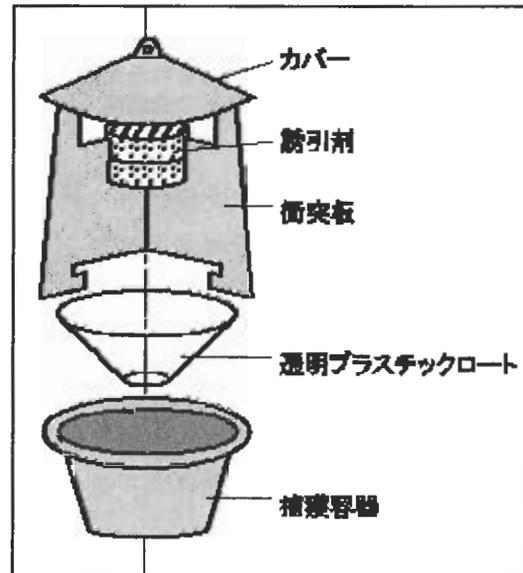


図-1 サンケイ式昆虫誘引器を改良した生け捕り用トラップ

##### ② 桜島におけるマツノマダラカミキリの生息状況と捕獲虫のマツノザイセンチュウ保持状況

桜島周辺におけるマツノマダラカミキリの誘引捕獲調査の結果、マツノマダラカミキリはすべての調査地で普遍的に捕獲された。一方、それらのマツノザイセンチュウ保持率は、枯損木の見られた薩摩、大隈半島の各調査地と桜島島内の長谷谷では高く、その他の地域では低い傾向がみられた（図-2）<sup>1, 3, 4)</sup>。

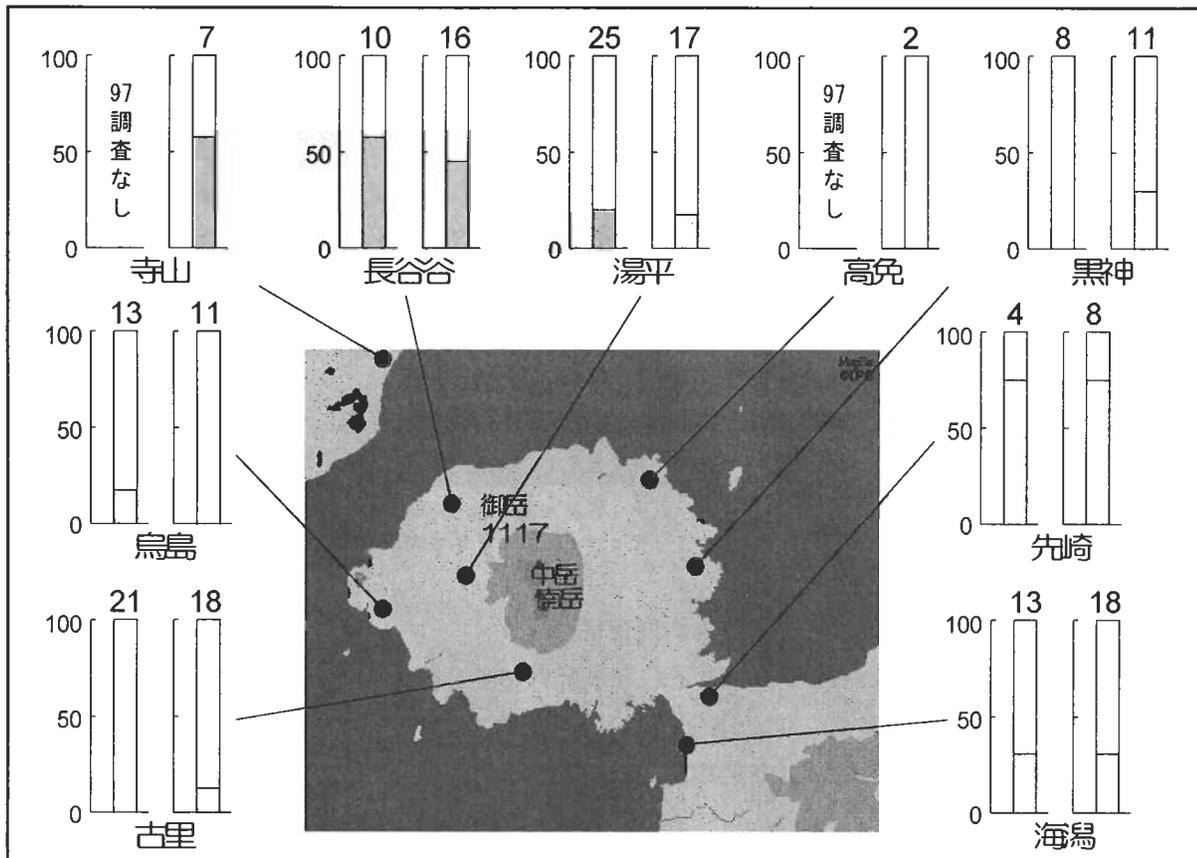


図-2 桜島とその周辺に設置された誘引トラップにおけるマツノマダラカミキリの捕獲数（グラフ上の数値）と捕獲虫のマツノザイセンチュウ保持率（%）。左と右のグラフはそれぞれ1997年および1998年の調査結果。

### ③ マツノマダラカミキリの摂食に及ぼす火山灰の効果

小容器内で、火山灰を付着させたクロマツ枝と付着させない枝を与えられたマツノマダラカミキリ成虫の2種の切り枝に対する選択性は明確でなく、摂食量はどちらも同程度であった。また、火山灰を付着させたクロマツ枝を与えられたマツノマダラカミキリ成虫と、付着させない枝を与えられた成虫の生存日数に有意差はみられなかった（一元配置分散分析、 $P > 0.1$ ）。ただし、3ヶ月以上生存の長命個体は火山灰を付着させない餌を与えた処理区でのみ見られた。これらの成虫の日あたり摂食数に処理区間での差はなかった（一元配置分散分析、 $P > 0.4$ ）（表-1）。

表-1 火山灰付着クロマツ枝を与えたマツノマダラカミキリ成虫の生存日数と日あたり摂食面積

餌クロマツ枝 *	供試虫数	生存日数 (日) (平均 ± SE)	日あたり摂食面積 (mm <sup>2</sup> ) (平均 ± SE)
火山灰付着 (湿)	10	38.7 ± 26.8	232.4 ± 94.2
火山灰付着 (乾)	10	40.4 ± 30.9	288.2 ± 132.4
火山灰付着なし (対照)	10	75.0 ± 68.3	305.8 ± 144.2

\* 表面を濡らしたクロマツ切り枝に火山灰を付着させたものを火山灰付着 (湿)、濡らさずに付着させたものを火山灰付着 (乾) とした。

#### ④ 桜島に自生するクロマツ幼樹の材線虫病感受性

鹿児島大学溶岩実験林内に自生するクロマツ幼樹にマツノザイセンチュウを接種した場合の発病率は、10,000 頭接種区で 46%、1,000 頭接種区で 28%と、従来の接種試験に比べ非常に低い値を示した(表-2)。1996 年に行われた予備実験においても同様の結果が得られていることから、この結果は当年度の気象条件等の偶然的な要因を反映したものとは考えられず、桜島に自生するクロマツの材線虫病感受性の低さを示すものと考えられた。

#### エ 考察

桜島では 1990 年代後半まで、九州地方のクロマツ林としては特異的に材線虫病被害が少なかった。この原因として、(1)島内にマツノマダラカミキリが分布しない、(2)マツノマダラカミキリは生息するがマツノザイセンチュウを保持していない、(3)マツノマダラカミキリに保持されるマツノザイセンチュウの病原性が低い、(4)桜島に自生するクロマツの材線虫病感受性が低い、(5)火山灰のためマツノマダラカミキリの摂食や生存が阻害される、(6)火山ガスのためマツノマダラカミキリの飛来や生存が阻害される、などの仮説が考えられた。

生け捕り型トラップによる誘引捕獲調査により、桜島でもマツノマダラカミキリは普遍的に存在するが、捕獲成虫のマツノザイセンチュウ保持率は枯損被害が見られた地域で高いことが示された。これにより、前述の仮説の(1)は棄却され、(2)は妥当性が示されたことになる。ただし、島内のマツノマダラカミキリの線虫保持率はゼロではなく、集中的に枯損木が発生していた長谷谷地区では 50 %前後の保持率が記録されていた(図-2)。この地域は海をはさんで薩摩半島に近接しており、当時激害が発生していた薩摩半島寺山方面からマツノザイセンチュウを保持するマツノマダラカミキリが海を渡って桜島に侵入していたことが示唆された。

桜島溶岩実験林におけるマツノザイセンチュウ接種実験により、桜島に自生するクロマツ幼樹の材線虫病感受性は通常のクロマツより低い傾向のあることが示された(表-2)。この感受性の低さをもたらす要因として、桜島に分布するクロマツの遺伝的な特性や、桜島の特殊な土壌条件(火山灰)などが考えられた。ただし、ここで示された感受性の低さは材線虫病の蔓延を阻止できるほどのものではなく、上の仮説の(4)のみで桜島における材線虫病の激害化阻害機構が説明されるとは考えられなかった。

火山灰のマツ枝への付着はマツノマダラカミキリ成虫の飛来や摂食を阻害するものと想定されてきた。しかし、成虫は小容器内では火山灰の有無にかかわらずマツ枝の樹皮を摂食した。また、強制的に火山灰付着マツ枝のみを与えられた場合でも、成虫の摂食量が減ったり、寿命が極端に短くなるようなことはなかった。これらの事実から、上の仮説の(5)の妥当性は乏しいと結論される。

これまでに調べられたことから、桜島における材線虫病の激害化は上記仮説の(2)と(4)の過程を介して阻害されてきたものと考えられた。ところで現在、桜島では激しい材線虫病被害が発生している。このことは、仮説(2)の状況が隣接する激害地からのマツノザイセンチュウ保持マツノマダラカミキリの飛来や被害丸太の人為的な持ち込みによりすでに崩壊し、仮説(4)の感受性の低さは病原の勢力の強い状況下では有効には働き得ないものであったことを如実に示してい

る。

#### オ 今後の問題点

前節で示した過去の桜島における材線虫病激害化阻害要因に関する仮説のうち、(3)と(6)が調べられずに残った。このうち(3)は島外からのマツノザイセンチュウが侵入し、蔓延してしまった現在の状況下では検討することが不可能である。(6)の火山ガスの影響は、桜島における近年の火山活動の沈静化と材線虫病被害の激害化との関連を考える上でも検討されるべき課題であるが、研究の実行に際しては有毒ガスの取り扱いという方法論上、設備上の問題点を解決する必要がある。桜島に自生するクロマツの材線虫病感受性の低さがマツ自体に由来するものか、土壌条件によるものかという点については、実験条件下で育苗された苗を用いた接種実験により明らかにしていく予定である。

#### カ 要約

材線虫病被害が特異的に少なかった鹿児島県桜島において、マツ枯損被害激化を阻害する生物的過程について検討、評価した。生け捕り型誘引トラップを用いた捕獲調査により、桜島にもマツノマダラカミキリは普遍的に存在するがそのマツノザイセンチュウ保持率は全般に低いことが示された。ただし、一部地域では隣接する激害地からのマツノザイセンチュウ保持虫の飛来があるものと推測された。また、マツノザイセンチュウ接種実験により、桜島に自生するクロマツ幼樹の材線虫病感受性は低い傾向のあることが示された。これらから、桜島における材線虫病の激害化は、生息するマツノマダラカミキリのマツノザイセンチュウ保持率の低さと自生するクロマツの材線虫病感受性の低さという2つの過程を通じて阻害されていたものと考えられた。クロマツ枝への火山灰の付着はマツノマダラカミキリの摂食や生存にほとんど影響せず、材線虫病激害化阻害要因とは考えられなかった。

#### キ 引用文献

- 1) 中村克典、曾根晃一、大隈浩美 (1999) サンケイ式昆虫誘引器を改良したマツノマダラカミキリ生け捕り用トラップ、日本応用動物昆虫学会誌、43 : 55-59
- 2) Ookuma, H., Sone, K., Nakamura, K., Tajitsu, H. and Sato, Y. (1998) Pine wilt disease on Sakurajima Island - Why not epidemic?, Abstracts of Symposium on Sustainability of Pine Forests in Relation to Pine Wilt and Decline, 32
- 3) 曾根晃一、福山周作、大隈浩美、田實秀信、佐藤嘉一、中村克典 (1999) 桜島におけるマツノマダラカミキリの生息状況、第110回日本林学会学術講演要旨集、735
- 4) 曾根晃一、大隈浩美、中村克典、田實秀信、佐藤嘉 (1998) 桜島におけるマツノマダラカミキリの分布と線虫保持状況、第42回日本応用動物昆虫学会大会講演要旨集、134

(中村克典)

## 第4章 松くい虫被害の総合的防除法の確立

### 1. 松くい虫の総合防除マニュアルの策定

#### ア 研究目的

本プロジェクトの第1章から第3章までで得られた個別防除技術を現行の防除法の中に組み込み、現地に適用するためのマニュアル作りを行うことを目的とした。

#### イ 研究方法

本プロジェクトの個別技術の開発のうち天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシについて、その寄生特性等が解明されたことから、サビマダラオオホソカタムシを現行防除システムのなかに組み込むために、現行の防除法で被害を終息に導く戦略、防除率の検討を行い、導入手法を検討した。

##### ① 現行の防除法で被害を終息に導く戦略

本病を絶滅させた沖永良部島の事例や微害を保っているマツ林の事例等から、考察した。

##### ② 被害量を横ばいとするための、防除率の検討

生存曲線やシミュレーション等からの推定ではなく、発想の転換を行い、現場で毎年同じ程度被害が発生している事例について、その防除率を推定する方法をとった。

##### ③ 個別技術の組み込みの検討

サビマダラオオホソカタムシの現行防除システムへの組み込みの可能性と導入手法の基本的な考え方を検討した。本プロジェクトで開発を手がけた個別技術の問題点を予測した。

#### ウ 結果

##### ① 現行の防除法で被害を終息に導く戦略

マツ材線虫病の防除研究では約30年にわたり大学、公立林試、国立林試等の多くの研究者が考えつく限りの手法を研究・開発してきた。これらの手法の中から、現場での実証を経て、多くの技術がふるい落とされ、現行の防除方法（伐倒駆除、予防撒布、樹幹注入）として残っている。このため、現行の防除法を置き換えるような防除法の開発は、ほぼ研究し尽くされたと考えられる。特に、航空防除に代わるような防除法の開発の可能性はきわめて低い。国会の付帯決議が要請している「特別防除を減らす方向」に対応するためには、現行防除法を使用して終息させる戦略を立てる必要がある。そこで、現行の防除体系の問題点を明らかにし、補完するために必要な新しい防除法とその施用場面を明らかにする。

保全するマツ林の決定：現在のマツ材線虫病の防除行政の現場は次の3者の三つどもえの関係として整理できる。1つは、防除予算の確保、2つ目は被害率、3つ目は守ろうとするマツ林の面積である。この3者の関係は相互に関係していることから、どこから解決していくかが難しい。マツ材線虫病の防除は完全を期した防除作業（防除率については後述）が必要であり、防除率と次年度の被害発生率との間に線形の関係はない。一定以下の防除率では、防除しない場合と差異が検出できないほどである。このため、防除予算が少ない場合、来年の被害の増加を前提に防除を実施するといったことができない。防除予算が制限なく確保されるのであれば、当年度の被害率が高くても、あるいは広い面積であっても、マツ林の維持は可能である。しかし、予算が無制

限ということはある得ないわけで、制限がある中では、被害率が低ければ、より広い面積が防除可能という関係になる。しかし、被害率は前年度の防除率に密接に関係していることから、これも予算との関係になっている。十分に予算がない状況では、被害率は制御できないことから、守ろうとするマツ林（以降保全マツ林という）の面積を限定せざるを得なくなる。被害量と予算に応じた保全林の面積が決定されることになる。

この予算は2つに分類される。1つは、被害が広範囲に激化した場合等に、短期（数年）の緊急対応の予算が確保される場合であり、他方は、数十年単位で保全マツ林を維持するために支出可能な予算の予測である。ただし、前者の執行も後者の予算水準に縛られるものと判断される。なぜならば、マツ材線虫病では一旦微害にしても、防除圧が低くなればいつでも再激化する。このため、結局、保全マツ林は微害を保持できる予算と面積にならざるを得ないことになる。何十年にわたり保全マツ林を維持する訳であり、このマツ林からは全く収入が見込まれない場合もあることから、予算の水準はかなり低いと考えざるを得ない。この点から、保全マツ林は（森林生態的、文化的、観光資源的、防災的等様々な意味で）保全に値する（と納税者の同意が得られる）ものでなければいけないことがわかる。また、被害は年度による変動があることから、防除予算も執行可能な幅の中にある必要がある。例えば、駆除は通常年度内に終了する必要があることから、新たな年度の予算では間に合わず、補正予算で組むことができる程度の予算の範囲内ということになる。すなわち、被害が一時的に拡大し、それに伴って緊急に大規模な予算が組まれたとしても、保全対象となるマツ林面積は、通常の年（微害で維持する）を対象とする必要がある。予算の規模が大きければ、微害にするまでの時間が短くなるという利点はあるが、守ろうとする面積を拡大しても、いずれは微害を維持する予算が確保できなくなり、再び激害とし、最悪保全マツ林まで崩壊に導くことになりかねない。

維持する被害率の決定：保全マツ林を維持するための被害率を想定する必要がある。もちろん被害0（ゼロ）を目指すことになるのだろうが、現実には、隔離された小面積の島を含め他からの侵入が想定されるわけで、必ずしも0である必要はないと判断される。特に、他のマツ林からの侵入が常時想定される本島では、単年度0にしても他からの侵入があり、当該地域の努力だけでは0の目標が達成できないことから、経常的に予算が確保される範囲を目標にし、被害を0にすることを目標にはしない方が賢明である。被害が減少するとマツ材線虫病の脅威が住民から忘れ去られ、予算が付かなくなることによって再発したときに対応が間に合わなくなることが往々にしてあり、常時マツ林の管理の形で予算が設定されていることが必要である。

被害量の想定は、そのマツ林の状況によるが、一般には年成長率を超えない設定で問題ないと判断する。ただし、マツ材線虫病の枯損は本数単位であることから、材積として収支が合っていればよいというわけにはいかない。閉鎖したマツ林を考えた場合、成立本数は徐々に減少すると考えられる。現実のマツ林とはかなり条件が違うが、北九州のアカマツ<sup>7)</sup>について、樹齢と成立本数の推移を表-1に示した。この例で、80年生の地位一等のマツ林を維持する場合の被害本数の許容範囲は3本/haとなる。ただし、防除する観点からは3本/haの被害木は多すぎると判断される。理由は100haのマツ林を維持するとして、300本の被害木の特別伐倒駆除に年間500万から1000万円を要することから、予算の持続性が危ぶまれるためである。継続的に維持するマツ林の被害本数の許容範囲は1本/ha以下ではないかと推測される。

表-1 北九州地方のアカマツの主林木のhaあたりの本数

地位\林齢	40	45	50	55	60	65	70	75	80
成立本数									
一等	558	483	427	385	353	328	308	291	276
二等	742	640	565	509	467	435	410	390	373
三等	1089	938	823	733	661	602	552	508	468
減少本数									
一等	15.0	11.2	8.4	6.4	5.0	4.0	3.4	3.0	
二等	20.4	15.0	11.2	8.4	6.4	5.0	4.0	3.4	
(/年) 三等	30.2	23.0	18.0	14.4	11.8	10.0	8.8	8.0	

周辺マツ林の扱い：保全マツ林を限定すれば、当然そのマツ林の周囲には、保全されないマツ林（周辺マツ林と称する）が発生する。このマツ林の扱いはいくつかの選択肢が考えられる。まず、放置すると当然被害は激化し、おおよそ5年でそのマツ林は崩壊することになるのが一般的である。図-1に予防撒布を中止し、その2年後に特別伐倒駆除を中止した事例を示した<sup>2)</sup>。

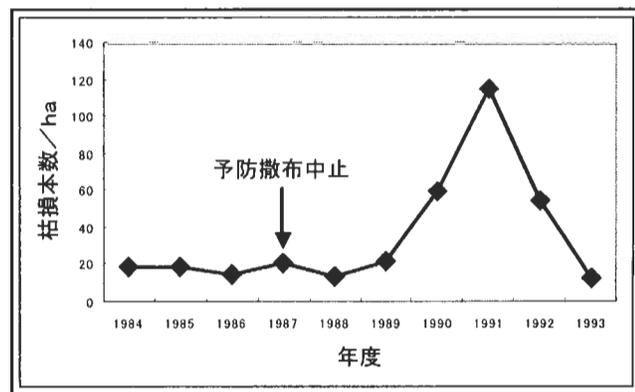


図-1 静岡県香貫山の枯損経過

保全マツ林に対する影響を少なくするためには、早期に枯れていないマツ生立木も伐採し、樹種転換を行うのが最も保全マツ林に対する影響は少ないことになる。これには、かなりの予算が必要となる。保全マツ林に対する影響を少なくするために、駆除等を行うという選択肢もあるが、駆除の完全性が低いと、駆除しない場合と同じとなり、完全性を高くすると、保全マツ林に対する影響を長引かせることになる。樹種転換（生立木・枯損木の伐採）費用と保全マツ林に対する影響量との勘案でどの選択肢をとるか判断が分かれるところであるが、保全マツ林に対する影響を最も少なくするためには早い段階で樹種転換を行うことが必要と判断される。もし、保全マツ林が予防撒布と樹幹注入によって守られるのであれば、放置しマツ材線虫病によって周辺マツ林をなくす方法が、費用対効果は最も高いと判断される。

次に、保全マツ林に影響を与える周辺マツ林の距離が問題となる。この問題は単にマツノマダラカミキリがどの程度飛翔するかでは解決できない。データはほとんどなく、被害の拡大の初期に調査された事例<sup>2)</sup>では、距離が拡大すると指数的に被害率が減少する関係になっている。年度の関係、伝播元の被害量や面積の大きさ等細かく解析すると一般的に適用するには問題が大きいが、他にデータが1例しかないことから、貴重な調査事例である。このデータの回帰式から距離と距離0の被害本数に対する割合を表-2に示した。3 km程度離れていることがよいと考えら

表-2 被害地の距離と距離0の被害本数に対する割合の計算値

距離 (km)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5
割合 (%)	34.3	11.7	4.0	1.4	0.5	0.2	0.1

れるが、一般的に、2 kmを超すと市町村界を越すことが多いことから、2 kmを目安とするのは妥当と考えられる。この場合危険率を倍とみて3%弱の影響がでることを前提にすることになる。

**予防撒布：**予防撒布は劇的な効果があることから、予防撒布だけで被害を終息させることができると考えがちであるが、予防撒布だけで被害を0にした事例はない<sup>9)</sup>。クロマツ林では前年の被害量を維持することができるという防除効果と判断される。例えば、図-2に示した佐賀県虹の松原の枯損経過を見ると、1972年から航空撒布がなされているが、1978年から1986年までの9年間被害は横ばいである。また、1991年に被害が増大した後も、空散がなされているが、被害量は上下しながらも1996年までほぼ横ばいにある<sup>8)</sup>。このような事例は多く、予防撒布だけでは、被害が減少しないことが分かる。なお、虹の松原では1996年に特別伐倒駆除（焼却）を導入したことから、19987年以降被害は急速に減少している。

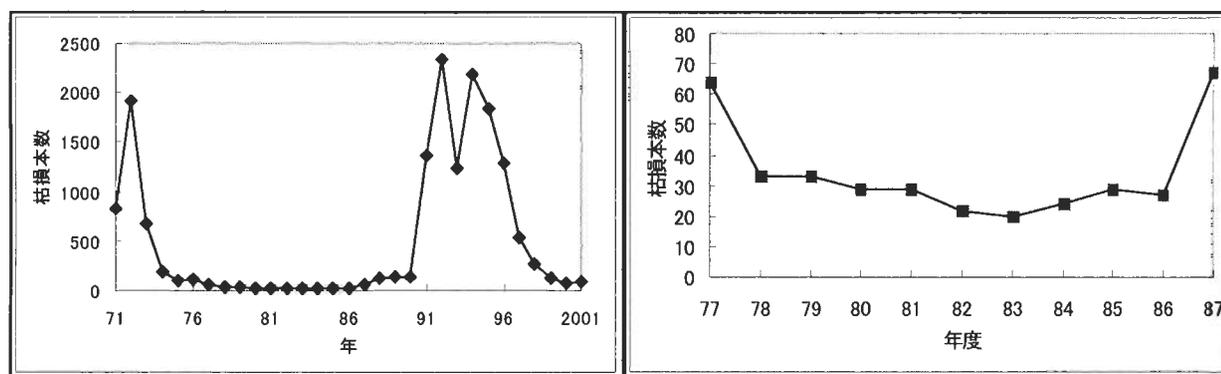


図-2 佐賀県虹の松原（200ha）の被害本数の推移（右は1977年から87年分を拡大した）

予防撒布の効果が高いことから、激害地が周辺2 km以内にあり、防除されないもしくは防除が不完全な場合も、予防撒布によって保全マツ林の成立本数を維持することができる。

予防撒布で注意すべき点は、撒布適期であり、適期の予測である。2001年に1か月前に蛹かの割合から推定する方法を考案し、現場への適用を試みた。まだ、適用度についての結論を得るところまでは至っていない。

**駆除：**もし駆除が100%できれば、次年度の被害は発生しないわけであり、マツノマダラカミキリの幼虫期の駆除は防除の基本であると考えられる。しかし、現実には野外における駆除が100%でないことから、被害が継続して起こっている。この原因として、2つが考えられた。1つは、枯損木の探索が完全でないことであり、2つ目は、枯損木の駆除が100%でないことである。この2つを総称し”駆除残し”と称する。前者では地上から林内を歩いて行う人間の探索では限度があることが明白であり、劣勢木、逆に高木の樹冠部が林内から見えない場合等が考えられた。対策として、ヘリコプター等による空中からの探索<sup>10)</sup>を行えば効果が高いと判断される。2つ目の駆除の不完全には、現場での作業時の駆除不足である。防除作業の発注等で発注量が材積で行われることから、枯損木の駆除部位が幹部にあると誤解されていると見られ、マツノマダラカミキリの寄生が多い枝部分が処理されていない可能性が高い。現場の駆除にあたる作業者の認識が重要であり、この点では教育がきわめて重要であると考えられた。ただし、枝まで焼却されたにしろ、伐倒時に飛び散った枝が探しきれなかったり、運搬途中で落ちたり等で100%の駆除は

できないと判断される。特に、地形との関係は重要で、マツ林に多い急傾斜地、地形が複雑な岩場、毒蛇の生息地等では重要な問題である。被害0を目指した防除の場合、最後の詰めを欠くことになる。この駆除残し問題は防除技術の開発にとって重要な点として抽出した。どの程度の駆除がなされていないかの推定はできなかった。

予算が不足していたり、年越し枯れで年度末の処理が間に合わない、あるいは次年度の当初に駆除をせざるを得ない等ですべての枯損木を駆除できない場合、被害木の部位、年越し枯れや2年1世代の個体群をどの順序で駆除するか、時間順で防除して良いかというという優先順位を検討した。

表-3 リュウキュウマツにおける30cm以上の幹部に寄生の割合

項目	主幹		枝（主幹の20% で計算）	合計	平均
	30cm以上	30cm未満			
サンプル数（1m丸太）	24	191	-		
材積(m <sup>3</sup> )	2.6	4.1	1.3	8.0	
総寄生数	254	1963	1696	3913	
寄生数/本（1m）	10.6	10.3	-		
寄生数/m <sup>2</sup>	9.2	21.9	-		
寄生数/m <sup>3</sup>	98.2	482.6	1274.5	1855.3	490.1
寄生数/m <sup>3</sup> の割合	5.3	26.0	68.7	100.0	

被害木の部位では、沖縄県における樹幹の地上高とカミキリの寄生頭数のデータ<sup>5)</sup>を使用した。直径30cmで分けると、全体材積の33%を占める30cm以上に寄生しているカミキリの割合は部位の合計割合で6.5%。単位材積に寄生するカミキリ密度は5.3%に過ぎなかった（表-3）。どうしても駆除が間に合わない場合等直径30cm以下の幹部分を後回しにすることは可能と見られた。カミキリの寄生部位については直径の大きい部分に少ないというデータは寒冷地から温暖地、アカマツ、クロマツで多数あるが、直径によるのか他の要因（樹皮厚、粗皮の形状等）によるのかの結論をはっきり出した報告はない。このため、現場の指導で、直径のみで防除の要不要を決定することにためらいがあると思われる。しかし、あくまで優先順位であり、駆除対象の100%を処理できない場合どうするのかという状況では、30cmを境に防除の要不要を決定しても有効であると判断された。

年越し枯れを想定し、夏から冬、次年度の春という順序で枯れが起こった場合、次年度の春の枯れまで完全に駆除する必要があるかという検討を行った。福島県のデータ<sup>1)</sup>による解析では、予算の1.5倍の枯れが発生した（通常の保全マツ林ではもっと低いと思われる）ことを仮定し、年内の枯れが50%、年越し枯れが50%とした場合（この数字は実態に近い）、時間順に駆除を行い、予算が切れたところで駆除を中止するという方法でも95%の駆除を達成できると計算された。寒冷地では、年越し枯れが次年度に発生することから、防除が不完全であり、これが原因で被害が終息しない主要因とされているきらいがある。ここでの仮定は被害量をかなり過大に見ていることから、現実には年度内の防除の完全性を目指した駆除を行うことによって、被害を制御することは可能と判断された。

表－４ 年越し枯れの駆除優先順位

枯れの時期	本数	寄生頭数／本	寄生総数	平等に防除			年内を優先で防除		
				防除割合	防除本数	防除頭数	防除割合	防除本数	防除頭数
年内の枯れ	50	40.6	2030	0.67	33.5	1360	100%	50	2030
年越し枯れ	50	3.4	168	0.67	33.5	113	33%	17	55
合計	100		2198		67	1473		67	2086
総防除率						67%			94.9%

寒冷地で見られる２年１世代のカミキリの防除効果についてみた。データは上と同様に福島県のデータである。前述と同様に、予算の１.５倍の枯れが発生、年１世代が５０％、２年１世代が５０％とした場合（この数字は実態より２年１世代の割合がかなり高い）、前年度の枯れから順に駆除を行い、予算が切れたところで駆除を中止するという方法でも９７％の駆除を達成できると計算された。この計算では、２年１世代の発生の割合を現実より非常に高い想定としていることから、現実には２年１世代のカミキリは無視しても問題はないと判断される。

表－５ ２年１世代の駆除優先順位

1世代	頭数	寄生頭数／1頭	総線虫数	平等に防除			年内を優先で防除		
				防除割合	防除本数	防除線虫数	防除割合	防除本数	防除線虫数
1年	50	2993	149669.1	0.67	33.5	100278	100%	50	149669
2年	50	124	6192.5	0.67	33.5	4149	33%	17	2044
合計	100		155861.6		67	104427		67	151713
防除率						67%			97.3%

まとめと問題点：以上の解析から、現行の個別の防除法はその目的とする場面で効果が不十分であると判断される技術はなかった。それぞれの個別技術を連携して使用した防除体系ならば、マツ材線虫病被害量を減少傾向にすることは不可能でないと結論される。ただし、そのためには、マツ材線虫病の高度な知見を周知し、駆使できること、実際の現場で最適の方法を適用できる立場にあること（あるいは、現場の担当者を説得できること）が重要である。これを解決するには、マツサイセンチュウ防除の専門家の養成や防除技術の商用化ができる環境作りが必要である。

国会の付帯決議「特別防除を減らす方向」に対応するために、現行の防除法で被害を終息に導く戦略を要約すると下記のとおりとなる。

保全するマツ林を固定的に決める。面積は１本/haの被害木の特別伐倒駆除を通常予算の中で常時支出可能な範囲とする。まず、その周辺マツ林の樹種転換を行い、予防撒布の継続によって当面の激害状態を回避し、周辺林分からマツ林をなくしたのち、駆除の徹底化をはかることによって被害を減少の方向に向かわせ、被害量が伐倒焼却やチップ化で十分対応できる量になれば、予防撒布を中止する。

以上の手法で実際に激害を微害に導いた、あるいは導きつつあるマツ林として、鹿児島県吹上浜・沖永良部島、佐賀県虹の松原、和歌山県煙樹ヶ浜があり、現行の防除体系でも終息に導くことができることを証明している。

② 被害量を横ばいとするための、防除率の検討

以上の解析では、駆除率をどの程度に想定すれば、被害が横ばいあるいは減少させることができるのかという設定をせずに解析した。従来から、しっかりした報告ではないが 80 % という数字が一人歩きしていたきらいがある。解決すべき問題点の 1 つである。

どの程度の防除率であれば、被害を横ばいあるいは減少に持っていけるかという数字が明示されなかった理由は、マツ材線虫病の発生しているマツ林は様々な要因があり、卵から成虫になる間の生命表、あるいは生存曲線等から決定することがきわめて難しいためであると判断される。また、シミュレーション等で推定した場合数字の信頼性が低いことが原因である。そこで、発想の転換を行い、現場で被害が毎年同じ程度発生している場合について、その防除率を推定する方法をとった。

既に述べたように予防撒布だけでは被害が減少しない事例がたくさんある。図-2に見られるように、予防撒布を行い、伐倒駆除が併用されている場所では、ha あたり 0.1 本という低い水準でも減少せず横ばいを保っている。また、一旦 ha あたり 10 本に被害が拡大しても、被害が増大している訳ではなく、減少もしていないということで、予防撒布は被害を横ばいにする効果を持っていると判断される。予防撒布は生存率を決める最終段階の成虫になったときの効果であることから、最低でも予防撒布による死亡率が達成できない場合、被害は増加方向に向く可能性がある判断される。すなわち、問題としている殺虫率は予防撒布の殺虫率を推定することによって明らかになると判断される。

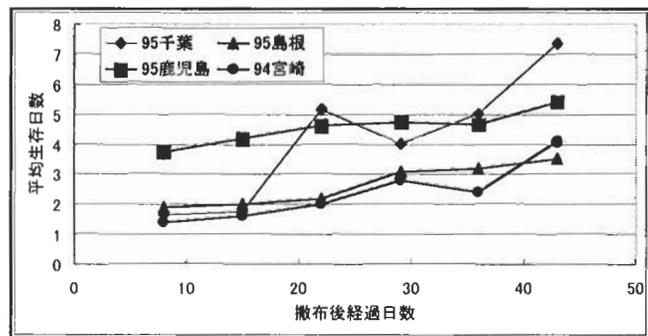


図-3 撒布後の経過日数と生存日数

現在最も普通に使用されている予防撒布薬剤であるスミチオン乳剤の薬剤試験から、1週間ごとに撒布マツの枝を与える生物検定がなされたデータのあるものを4件選んだ<sup>6)</sup>。調査日ごとの平均生存日数を示したものが、図-3である。

スミチオン乳剤はカミキリの羽化期間中3週間をおいて2回撒布されることから、散布後22日目までの平均生存日数をとると3.0日であった。死亡の判定は毎日なので、既に前回調査直後の1日前から調査直前に死亡したものを計数することから、この数字から0.5日を引いた数字2.5日が正しい平均生存日数と考えられる。マツノマダラカミキリ成虫の野外における生存日数は完全に不明である。飼育条件ではあるが、野外に近い条件のデータ<sup>3)</sup>から平均生存日数を計算すると41日となった。生存率は約6.1%となった。予防撒布の効果は、個体群のなかのある個体を殺虫するというのではなく、生存期間のうちの初期の2.5日間生きている状態なので、線虫の離脱数との関係を考慮する必要がある。線虫の離脱はカミキリの生存期間中で一定でないと考えられていることから、線虫の離脱経過を計算に入れる必要があるが、現在、学会では線虫の離脱曲線は初期にピークがあるとする意見と後期にあるとする2つに意見が分かれている。今回の解析では、どのデータを使用すべきかの結論が得られなかったため、単純にスミチオン2回撒布の場合の死亡率を使用することとする。このため、数字の確定については、なお検討が必要である。

また、今回対象にしたマツ林は大部分クロマツで構成されていた。マツの線虫に対する抵抗性

は被害の増大に大きく関係している。アカマツはクロマツに比べかなり高い抵抗性をもっていることから、アカマツでは被害量を横ばいにする殺虫率はクロマツの場合より低くてもよい可能性が高い。

以上のことを前提に、被害量を減少させるためには約 93 %以上の殺虫率を得る必要があるとして話をすすめる。

### ③ 個別技術の組み込みの検討

現行防除法の検討の項目で抽出したように、駆除残しが、終息のネックになっている。丁寧な防除作業によって解決される可能性もあるが、それには例えば林地を掃くような作業が必要で、労働力と予算の増大を招く。このため、現行の防除体系はそのまま、この部分が解決される技術が開発されれば、大きな進展となる。このためにサビマダラオオホソカタムシの放飼によって人間が見落としした被害枝等のマツノマダラカミキリ幼虫に寄生し、マツノマダラカミキリの生存率を落とすことができると期待された。駆除率が 93 %以上に上がらないために被害が毎年横ばいの林分等では、サビマダラオオホソカタムシの殺虫率は多少低くても、人間が防除しきれなかった被害枝等に寄生すれば、たとえ 10 %の寄生率であっても寄生率に見合った効果が期待できると判断された。このような使い方をすることは長い期間必要としない。例えば、激害状態を周辺マツ林の樹種転換、予防撒布、伐倒焼却で微害状態としたが、どうしてもこれ以上減少しないという場面では、少し防除圧を強化するだけで被害の減少が見込まれるので、数年間サビマダラオオホソカタムシを増殖し、放飼することによって、さらに被害を減らす効果が期待された。また、サビマダラオオホソカタムシが野外で継続的に世代交代ができる場合は、駆除が行き届かない急傾斜地等にヘリコプターで放飼するといったことも可能性がある。この場合、人間の駆除努力による殺虫率の補完関係をしっかりと計算した上で放飼する必要がある。

以上の他の個別技術の総合防除への組み込みについての問題点は下記のとおりである。

殺虫力の高い B.t が見つければ、現行の予防散布に代わることができる可能性はある。マツと固有に共生する外生菌根菌の保全を考えると、枯損が進行中の林分であっても、マツ林の群状の保全を行う必要がある。火山灰等の利用が可能になっても、手法としての火山灰施用の効果は限定的なものと考えられる。抵抗性誘導を利用したマツ枯損防止技術が開発されたとして、組み込むには作業量が莫大となり点をどう克服するか問題である。

### エ 考察

この項はその研究の性格から、結果の中で考察部分まで言及したので省略する。

### オ 今後の問題点

現行防除でマツ材線虫病を終息に導くマニュアルの骨子を策定した。現場に適用するためには様々な場面を想定し、データの裏付けをつけてマニュアルにする必要がある。このテーマは新しい知見の発見といった研究ではなく、現場により密着した解析であることから、機関誌、パンフレットといった文書化だけでなく、現場に直結した技術の移転が必要である。今後、講演、講習、研修、委員会等を通じて、普及につとめる。

必要な防除率については、さらに考察を進める。

サビマダラオオホソカタムシの組み込みについては、新しい知見が分かり次第現行システムに組み込んだ場合の効果を明らかにしていく。

#### カ 要約

現行の個別防除法の有効性を明らかにした。また、これらの個別技術を駆使することによって被害を減少方向に導くことが可能であることを示した。その中で、現行の防除法の問題点として駆除における被害木の防除残しが重要であることを示した。より低い被害水準に導くために、本プロジェクトの個別技術の開発のなかで寄生特性等を解明した天敵昆虫サビマダラオオホソカタムシは現行防除法に組み込む素材として有望であることを示した。

#### キ 引用文献

- 1) 在原登志男 (1986) 福島県におけるマツの枯損動態に関する研究、福島林試研報、19、43-72
- 2) 小河誠司、萩原幸弘 (1980) 材線虫病によるマツ枯損被害拡大の様相について、森林防疫、29、115-117
- 3) 岸洋一 (1988) マツ材線虫病－松くい虫－精説、トーマスカンパニー、302pp
- 4) 小林富士雄他 (2001) 松くい虫被害変動要因対策推進調査報告書、林野庁、23pp
- 5) 槇原 寛 (1985) 沖縄県におけるマツクイムシの生態について、沖縄開発庁沖縄総合事務所 農林水産部
- 6) 農林水産航空協会 (1994、1995) 平成6、7年度農林水産航空技術合理化試験成績書
- 7) 林野庁・林業試験場 (1960) 北九州地方のあかまつ林林分収穫表、収穫表調整業務研究資料、25
- 8) 佐賀営林署 (2001) 松くい虫被害量の推移、佐賀営林署業務資料
- 9) 田村弘忠 他 (1998) 松くい虫 (マツ材線虫病)－沿革と最近の研究－、全国森林病虫獣害防除協会、274pp
- 10) 吉田成章・田畑勝洋・中村克典 (1997) 松くい虫枯損木のヘリコプターによる探査システム、森林防疫、46、8-13

(吉田成章)

---

「交付金プロジェクト」は、平成13年度に森林総合研究所が独立行政法人となるにあたり、これまで推進してきた農林水産技術会議によるプロジェクト研究（特別研究など）の一部、および森林総合研究所の経費による特別研究調査費（特定研究）を統合し、研究所の運営費交付金により運営する新たな行政ニーズへの対応、中期計画の推進、所の研究基盤高揚のためのプロジェクト研究として設立・運営するものである。

この冊子は、交付金プロジェクト研究の終了課題について、研究の成果を研究開発や、行政等の関係者に総合的且つ体系的に報告することにより、今後の研究と行政の連携協力に基づいた効率的施策推進等に資することを目的に、「森林総合研究所交付金プロジェクト研究 成果集」として刊行するものである。

---

森林総合研究所交付金プロジェクト研究 成果集 1

「松くい虫被害の生物的防除による総合的研究調査」

発 行 日 平成14年8月30日

編 集・発 行 独立行政法人 森林総合研究所

〒305-8687 茨城県稲敷郡茎崎町松の里1

電話. 0298-73-3211 (代表)

印 刷 所 朝日印刷株式会社

